

920MHz 帯マルチホップセンサーネットワーク技術を 応用した移動無線通信システムに関する調査検討

報告書

平成 26 年 3 月

920MHz 帯マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した
移動無線通信システムに関する調査検討会

はじめに

日本は、これまでの高度成長の時代から成熟期に差し掛かり、主役がモノ作りから、情報・サービスの形態に移りつつある。インターネットやスマートフォンの普及により、いつでもどこでもいろいろなサービスが受けられるようになってきた。同時に、スマートフォンなどの携帯網への周波数帯域の割り当て要求が高まっている。このような背景の中で、900MHz 帯周波数再編が行われ、平成 24 年 7 月から 920MHz 帯アクティブ系小電力無線システムとしての利用が開始されている。

これまで 2.4GHz 帯では、電波の直進性や送信電力の上限により、無線通信距離や無線通信品質に制限があった。2.4GHz 帯より到達距離や回り込み特性に有利な 920MHz 帯での利用が可能となることにより、屋外での利用も含めた新たなアプリケーションへの応用が可能になると考えられている。また一方で、クラウド側にデータを蓄積して、これを活用するビッグデータ、M2M(Machine to Machine)、モノのインターネット IoT (Internet of Things) をキーワードとする新しいアプリケーションが期待されている。これらのビジネスの立ち上げを加速するためには、センサ等のデータを簡単に集められる各種システムを揃えることが重要である。

今回、応用の一つとして、多数の移動体からのデータを同時に取得するマルチホップセンサーネットワークについて技術的条件を検討した。利用ニーズとして、マラソンやウォーキングを想定し、生体センサ情報の生データをリアルタイムで計測できるシステムを検討した。本システムの技術的条件および通信方式を検討し、試作機の製作からその試作機を用いた実証試験まで行った。実証試験は、犬山マラソンで行った。実際に実験用ランナーに無線機とセンサを付けてもらって、無線システムを評価した。犬山マラソンは愛知県では大きな大会であり、約 1 万人のランナーが参加していて、マラソンの愛好者が多いことに改めて驚かされた。それと同時に、マラソンでの事故の防止や健康管理、自分の走行の分析ができる無線機器にも潜在ニーズがあることを確認した。

今回の技術試験では、920MHz 帯を応用する場合の課題を明らかにし、様々な活用方法についても検討した。2.4GHz 帯よりも送信出力が出せて、電波の回り込みも期待される 920MHz 帯は、使い易い周波数であり、各種応用に活用できる可能性がある。ここで得られた成果が、920MHz 帯を含めた無線システムの更なる発展に繋がれば幸いである。

最後に、この検討会にご協力いただいた構成員及びマラソンの実証実験や各種試験にご協力いただきました関係者の方々に心より感謝いたします。

平成 26 年 3 月

920MHz帯マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した
移動無線通信システムに関する調査検討会

座長 小栗 宏次



目 次

第 1 章	調査検討の概要.....	1
1.1	検討会の趣旨と目的	1
1.2	検討内容	1
1.3	検討会の組織	1
1.4	検討会の設置期間	2
第 2 章	技術試験の概要.....	3
2.1	技術試験の概要.....	3
2.2	利用ニーズについて	3
2.3	技術的条件及び通信方式の検討	3
2.4	試験機の機能と性能	3
2.5	基礎技術試験	4
2.6	応用試験	4
第 3 章	利用ニーズの検討	5
3.1	ウォーキングへの適用検討.....	5
3.2	マラソンへの適用検討.....	6
3.3	まとめ	9
3.3.1	ヒアリング結果のまとめ	9
3.3.2	応用分野の検討	10
第 4 章	技術的条件及び通信方式の検討	11
4.1	技術的条件の検討	11
4.2	通信方式の検討.....	11
4.3	まとめ	17
第 5 章	試験機の製作	19
5.1	基地局の構成	19
5.1.1	基地局の一般仕様	19
5.1.2	基地局の無線仕様	20
5.1.3	基地局の概観図	21
5.2	移動局の構成	22
5.2.1	移動局の一般仕様	22
5.2.2	移動局の無線仕様	22
5.2.3	移動局の外観図	23
5.3	無線動作仕様	24
5.3.1	通信手順.....	24
5.3.2	ビーコン信号の伝送.....	26
5.3.3	センサ情報の伝送	27
5.3.4	ビーコン信号の検索.....	29
5.3.5	センサ情報の再送制御	29

5.4	まとめ	32
第 6 章	基礎技術試験	33
6.1	試験内容	33
6.1.1	無線の基礎性能の評価内容	33
6.1.2	試作機の機能と性能評価	33
6.2	無線の基礎特性の評価	34
6.2.1	使用計測器	34
6.2.2	各試作機の基本特性	34
6.2.3	移動局の特性	35
6.2.4	基地局の特性	36
6.3	電界強度	37
6.3.1	設置環境	37
6.3.2	基地局の送信電界強度の測定結果	38
6.3.3	基地局の受信電界強度の測定結果	39
6.3.4	移動局の送信電界強度の測定結果	40
6.3.5	移動局の受信電界強度の測定結果	41
6.3.6	移動局の受信電界強度の測定結果	41
6.4	PER の評価	42
6.4.1	PER の実験方法	42
6.4.2	実験結果	42
6.5	無線通信距離の評価	43
6.5.1	通信距離の評価方法	43
6.5.2	通信距離の測定結果	44
6.5.3	通信距離の理論値の評価	45
6.6	スループット	45
6.6.1	スループットの試験方法	45
6.6.2	スループットの試験結果	46
6.7	伝送遅延時間の評価	46
6.7.1	使用計測器	47
6.7.2	実測結果	47
6.7.3	システムへの影響検証	48
6.8	干渉実験の評価	49
	本干渉試験では、本試験機は、スループット試験と同じシステム構成とし、移動局 1 台に、50 台分の センサ情報を送信させるようにする。この状態で、他の 920MHz 帯を利用している機器を近くに設置し、 両方の機器の通信品質を評価した。	49
6.9	まとめ	51
第 7 章	応用試験	53
7.1	マラソンを想定したマルチホップ事前試験	53
7.1.1	マルチホップ試験方法	53

7.1.2	マルチホップ試験結果	53
7.1.3	通信干渉試験の方法	55
7.1.4	通信干渉試験の結果	56
7.2	実証試験	56
7.2.1	犬山マラソンでの試験内容と試験方法	56
7.2.2	マルチホップ通信	60
7.2.3	通信品質	67
7.2.4	受信信号レベルと通信距離の関係	71
7.2.5	センサ情報の取得結果	72
7.2.6	送信総和時間の評価	73
7.3	まとめ	74
第 8 章	まとめ	76
8.1	技術試験のまとめ	76
8.1.1	利用ニーズのまとめ	76
8.1.2	技術的条件及び通信方式のまとめ	76
8.1.3	試験機の機能と性能のまとめ	77
8.1.4	基礎技術試験および応用試験結果のまとめ	77
8.2	今後の課題と提言	77
8.2.1	標準規格への提言	77
8.2.2	技術試験の課題	78
付 録		80
付録 1	構成員名簿	81
付録 2	調査検討会の開催状況	82
付録 3	実験試験局免許手続き	84
付録 4	試作機の回路図	86
付録 5	基地局の LAN のノイズ対策	87
付録 6	マラソン前の事前実験の補足資料	88
付録 7	犬山マラソンのコースの概要	90
付録 8	犬山マラソンの実験の風景	91
付録 9	犬山マラソンの実験結果の補足資料	93
付録 10	920MHz 帯マルチホップ無線システムの送信時間総和の検討	98
付録 11	用語解説	100

第1章 調査検討の概要

1.1 検討会の趣旨と目的

900MHz 帯周波数再編に伴い、平成 23 年度に 920MHz 帯におけるマルチホップセンサーネットワーク技術によるスマートメーター等の導入に向けた関係省令の改正が行われ、920MHz 帯アクティブ系小電力無線システムとして平成 24 年 7 月から利用が開始されている。

マルチホップ通信は、少ないチャンネル数により多数の対象からデータを収集することに適しており、これまで主に利用されていた 2.4GHz 帯から新たに 920MHz 帯での利用が可能となることにより、野外等の広範囲での通信が可能となる。

スマートメーターでは、固定されたノード間でのデータの収集を想定しているが、従来の 2.4GHz 帯より到達距離や回り込み特性に有利な 920MHz 帯での利用が可能となることにより、比較的低速度であれば、多数の移動体からのデータを同時に取得する無線システムについても実現が可能となると考えられる。

こうした状況を受け、920MHz 帯アクティブ系小電力無線システムを、マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した低速度の移動体からの比較的小規模のデータ収集に適用し、具体的な用途での実用化に必要な技術的条件について検討を行うことを目的とする。

1.2 検討内容

(1) 無線システムの試作と技術試験の実施

利用目的別の所要の通信容量・通信時間・通信間隔等の検討に基づき、920MHz 帯アクティブ系小電力無線システムを活用して、移動によりノード数、ノード間の距離、遮蔽等、環境が常に変化する条件下でマルチホップによる通信を実現する無線システムを試作し、必要な通信容量を確保するために必要な通信方法と技術的条件について調査検討及び技術試験を行う。所要通信品質の確保に必要な、現行の技術基準等の改善点と課題について検討する。

(2) 電子タグ等の現行システムとの共用条件の検討

920MHz 帯を使用する電子タグシステムやスマートメーター等への干渉について検討し、周波数帯を共用するための技術的条件等について調査検討及び技術試験を行い、キャリアセンス時間、キャリアセンスレベル等の技術基準の改善点について検討する。

(3) 実際の使用条件下での実証

10 人程度の規模のシステムを構築し、市民マラソン大会等での実地検証を実施する。

1.3 検討会の組織

本検討会は、「920MHz 帯マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した移動無線通信システムに関する調査検討会」（略称マルチホップ移動通信調査検討会）と称する。検討会の組織は、以下の通りとする。

(1) 検討会は、東海総合通信局長が委嘱した構成員をもって構成する。

(2) 検討会に、座長を置く。座長は構成員の互選により選出する。

- (3) 座長は、検討会を招集し、主宰する。
- (4) 検討会に座長代理を置くことができる。座長代理は、座長が指名する。
- (5) 座長は、必要と認める者を構成員として追加することができる。
- (6) 座長は、必要と認める者を本会に出席させることができる。
- (7) その他、会の運営に必要な事項は座長が定める。

1.4 検討会の設置期間

本会の開催期間は、平成 25 年 9 月から平成 26 年 3 月末までとする。

第2章 技術試験の概要

2.1 技術試験の概要

本技術試験では下記の技術試験を実施した。 -

- (1) 920MHz 帯におけるマルチホップセンサーネットワークの利用ニーズを検討した。
- (2) 上記利用ニーズから無線システムの技術的条件及び通信方式を検討した。
- (3) 上記無線システムを評価するために試作機を製作した。
- (4) 試作機を用いた基礎技術試験を実施した。
- (5) 実際のマラソン大会で、試作機を利用して応用試験を実施した。
- (6) 本技術試験の結果から無線システムの実用化のための課題と提言を検討した。

2.2 利用ニーズについて

920MHz 帯におけるマルチホップセンサーネットワークの利用ニーズに関して、特にマラソンやウォーキングへの応用を検討した。愛知ウォーキング協会とマラソンの計測システムを開発しているマイクロトークシステムズにヒアリングして利用ニーズをまとめた。また、調査検討会で各種応用や実用化時の課題に関して検討した。

2.3 技術的条件及び通信方式の検討

マラソンやウォーキングに適用するための無線システムを検討した。検討項目としては、データの伝送速度、端末（人）の移動速度、端末の収容台数、端末間の伝送距離、基地局の通信範囲などである。今回の無線システムでは、比較的小規模な端末が接続する無線システムを想定して、表2.3-1に示す無線システムの仕様を検討した。

表 2.3-1 無線システムの仕様

項目	機能
伝送速度（物理層）	500kbps
変調方式	2FSK
収納端末数	～50 台
ホップ数	～5 ホップ
通信距離	約 100m/1 ホップ、約 500m/5 ホップ

2.4 試験機の機能と性能

マラソンなどの応用試験のために以下の台数の無線機を試作した。

表 2.4-1 犬山マラソンの応用試験用試験機

機器	台数	備考
基地局	2 台	移動局のデータを収集する無線機
移動局	10 台	ランナーが装着することを前提に小型化した無線機

2.5 基礎技術試験

試験機の基本的な無線特性を評価した。評価項目は、送信周波数、送信電力、受信感度、電界強度（3m 法で測定）、通信距離、伝送速度、PER、伝送遅延時間などである。試験は、電波暗室および見通しの良い郊外の工場の敷地や道路で行った。

2.6 応用試験

試作機を用いて、実際の使用状態を想定した環境で実証試験を行った。実証試験は、第 36 回読売犬山ハーフマラソン大会（2014 年 2 月 23 日）の 10Km コースにて行った。応用試験に使用した機器は下記の通りである。

表 2.6-1 犬山マラソンの試験機器一覧表

機器	台数	備考
基地局	2 台	マラソンコースに設置
移動局	7 台	ランナーが装着、2 台にセンサを装着
中継局	3 台	マラソンコースに設置 中継局は、移動局と同じ仕様の機器である
評価用 PC	1 台	本部に設置

2 台の基地局、3 台の中継局をマラソンコースに設置し、7 台の移動局をマラソンのランナーに装着し、実際のマラソン大会で試験を行った。収集したデータは、移動局（端末）からの生体センサ、加速度センサ、GPS の位置情報である。各移動局のマルチホップのルーティング情報、PER（Packet Error Rate）、無線通信距離（人体による遮蔽等の影響度）を評価した。携帯電話網とクラウド環境を利用して、収集したデータを、本部の評価用 PC でモニタリングできるようにした。また、マラソンの前日にマラソンのタイム計測システムとの干渉実験を行い、お互いが干渉しないことを確認した。

第3章 利用ニーズの検討

本章では、マラソンおよびウォーキングへの適用に関してヒアリングを行い、検討した内容を報告する。

3.1 ウォーキングへの適用検討

ウォーキングへの適用に関しては、愛知県ウォーキング協会^[3-1]にヒアリングした。ヒアリングの内容を表 3.1-1 にまとめた。ヒアリング結果を無線システムの要件に反映した。

表 3.1-1 愛知県ウォーキング協会へのヒアリング結果

NO	項目	ヒアリング内容	無線システムへの要件	製品化時の要件
1	例会の頻度	月に1回		電池寿命(未使用時のリーク電流)
2	歩く距離、時間	平均12～13Km、1時間～5時間	無線通信距離、メッシュネットワークのマルチホップ段数・更新周期	連続動作時間
3	参加者の歩く・走るスピードのばらつき	時速 ～4Km		
4	どの程度のグループに別れて歩くとか	団体歩行:100m～200mの列 自由歩行:ばらばら		
5	参加者の人数	例会の場合 約170名(会員は300名)	接続端末数	
6	年齢層など	60～70歳代が80%、男性が60%		使い易さ
7	世話人・ガイドの人数	先頭と最後尾、交通整理、安全誘導	情報を集約する基地局の数	
8	休憩の間隔	トイレ休憩。頻度はコースによる。 昼休み 45分程度		連続動作時間
9	健康状態で注意すべきこと	熱中症等		製品コンセプト
10	センサへの要望	目的	健康になりたい	製品コンセプト
11		センサの種類	脈拍、体温など	無線伝送速度
12		形状	腕時計タイプ、ネックストラップ等	アンテナの実装、人体による無線通信品質の影響
13		サイズ	同上	小型化実装
14		重量	同上	小型化実装
15		電池寿命	1日～2日	連続動作時間

また、その他に下記の情報をいただいた。

(1) 例会に関して

愛知県には、9つのグループがある。大きな大会では、1000人単位で参加。東京では、5000人参加の大会もある。大きな大会は、自由歩行が多い。早い人は、6kmのスピード、遅い人は、いろいろ散策しながら歩行する。

(2) 参加理由他

健康になりたいという理由が一番多い。健康への意識付けにはなるが、週1回程度のウォーキングではだめ、普段から歩く必要がある。

(3) センサへの要望

夏の熱中症が問題（救急車を呼ぶ例もある）。危険であることを知らせてもらえるのは良い（脈、体温）。本人は大丈夫だと言っても、途中でやめさせたいときのデータとして使える。若いときに登山やスポーツをしていた人ほどあぶない（過信している人）。センサに関しては、会員で興味のある人もいる。エプソン製品の評価をしたこともある。高齢者向けには、簡単に使える方が良い。見やすい表示が好ましい。カロリー、歩数などは、万歩計でカバーできている。

(4) センサ実用化時の注意点

心臓のペースメーカを付けている人には無線機器は注意が必要である。

3.2 マラソンへの適用検討

マラソンへの適用に関しては、マラソンの自動計測システムを開発しているマイクロトークシステムズ^[3-2]にヒアリングした。その結果を表 3.2-1 に示す。ヒアリング結果を無線システムの要件に反映した。

表 3.2-1 マイクロトークシステムズへのヒアリング結果

NO	項目	ヒアリング内容	無線システムへの要件	製品化時の要件
1	大会の頻度	毎週		電池寿命(未使用時のリーク電流)
2	歩く距離、時間	10Km～42.195Km、30分～7時間		連続動作時間
3	参加者の歩く・走るスピードのばらつき	時速 3～20Km	無線通信距離、メッシュネットワークのマルチホップ段数・更新周期	
4	どの程度ばらつくか	フルマラソンでは先頭がゴールしたときに最後尾は15km地点あたりを走っている。		
5	参加者の人数	～3万人	接続端末数	
6	年齢層など	健康志向、アスリート系		使い勝手
7	休憩所の間隔(開門)	5Km間隔	情報を集約する基地局の数、間隔	
8	健康状態で注意すべきこと	心臓への負担、腰、足への負担		製品コンセプト
9	センサへの要望	目的	記録更新、健康管理、カロリー計算、ピッチ管理、安全管理	製品コンセプト
10		センサの種類	脈拍、加速度、GPS	無線伝送速度
11		形状	腕時計タイプ	アンテナの実装、人体による無線通信品質の影響
12		サイズ	同上	小型化実装
13		重量	同上	小型化実装
14		電池寿命	1日	連続動作時間

その他に以下のコメントをいただいた。

(1) マラソンでのタイム計測でのタグの利用状況

表 3.2-2 にマラソンの自動計測システムの一覧表を示す。マラソンの自動計測システムは、ゼッケンなどに付けるタグとそのタグの通過を検知するマッドアンテナで構成される。タグは、電池が不要なパッシブタグ(Passive Tag)と、電池が必要なアクティブタグ(Active Tag)の二つの方式がある。また、利用する周波数帯は、低い周波数帯(数十 MHz 帯以下)が利用されている方式と、UHF 帯(920MHz 帯)の方式のものがある。UHF(920MHz)パッシブタグは雨に弱いという課題があり、雨が降ると計測できないことがある。

なお、マイクロトークシステムズの製品は J-CHIP で、低い周波数帯の製品であり、タグへのトリガ周波数が 93.75kHz で、タグが ID 情報を発信する周波数が 300MHz である。

ゼッケンに付けたタグの場合、人体の影響(人体が電波の遮蔽物になる)で ID を取得できないこともある。ゴール時に万歳させるのは、ゼッケンを腕で隠さないようにする目的もある。

表 3.2-2 マラソンの自動計測システム

電池の有無	周波数	製造会社	国籍	タグ取付位置	タグ運用形態	ライセンス料金の有無	公称取得率(ゴール地点)	公称取得率達成(道路巾4m)に必要な機器		受信装置の形状	1受信機の計測可能巾	公称取得達成率に必要な受信装置数	水分の影響	鉄の影響
								必要計測ライン数	必要計測装置					
Passive	134KHz	ChampionChip	オランダ	シューズ	再利用	有(年500円)	99.95%	計測2ライン	2台	マットアンテナ	4m	8枚	○	×
		WinningTime	イタリア	シューズ	再利用		99.95%	計測2ライン	2台	マットアンテナ	4m	8枚	○	×
	125KHz 6.8MHz	IPICO	アメリカ	シューズ	再利用		99.99%	計測4ライン	4台	マットアンテナ	2.5m ～5m	16枚	○	×
	13.56MHz	DAG	フランス	ゼッケン	使い捨て		99.00%	計測2ライン	4台	マットアンテナ	4m	4枚	△	×
	UHF	ChronoTrack	アメリカ	シューズ ゼッケン	使い捨て	有	99.95%	計測3ライン	3台	工事中 ケーブルマット	2m～ 8m	12枚	×	×
		Jaguar-Innovative TimingSystem	アメリカ	ゼッケン	使い捨て		99.95%	計測1ライン	1台	空中アンテナ	4m	1ゲート アンテナ	×	×
		MYLAPS	オランダ	シューズ ゼッケン	使い捨て	有	99.95%	計測3ライン	3台	マットアンテナ	2m～ 8m	12枚	×	×
		Orbiter	アメリカ	シューズ ゼッケン	使い捨て 再利用		?	計測1ライン	1台	マットアンテナ スタンドアンテナ	2m以下	2枚	×	×
		RFID Systeme	アメリカ	ゼッケン	使い捨て 再利用		99.50%	計測1ライン	2台	工事中 ケーブルマット	4m～ 8m	8枚	×	×
Active	125KHz 6.5MHz	AMB	オランダ	シューズ	再利用	有(条件 多種)	99.99%	計測1ライン	1台	ワイヤー アンテナ	2m～ 16m	1ループ アンテナ	○	○
	93.75KHz 300MHz	J-CHIP	日本	ゼッケン	再利用		99.99%	計測1ライン	1台	マットアンテナ 空中アンテナ	4m～ 12m	1枚	○	○

(2) センサに関する要望

マラソン大会では、脱水症状、心臓発作、けいれん等で緊急搬送されるケースがしばしば発生しているので、レース中の事故を未然に防げるようなシステムが望ましい。

(3) データ分析例

ホノルルマラソンはランナーデータを公開している^[3-3]。図 3.2-1 に、ホノルルマラソンでのランナー一走行位置の分布を示す。データは、2013 年 12 月 9 日のものである。参加者は、3 万人、2.4 万人がゴールしている。ゴール時の先頭からの遅れは、約 7 時間である。レース後半に集団がばらける傾向にある。

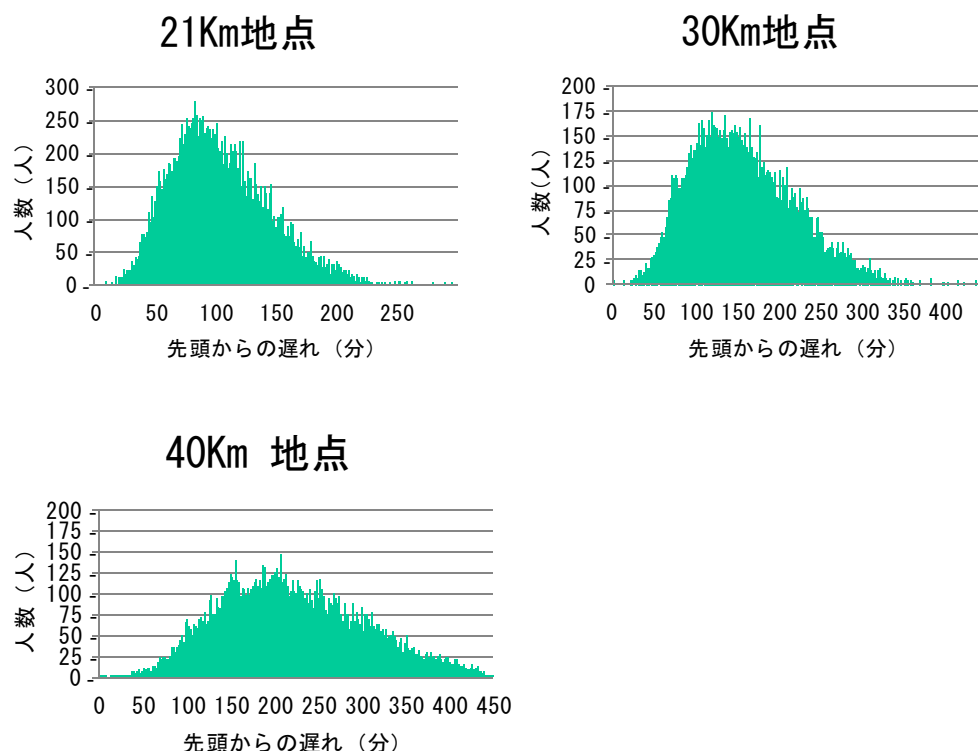


図 3. 2-1 ホノルルマラソンの例

(4) GPS ウオッチに関して

マラソンでは、GPS ウオッチが利用されている。表 3. 2-3 に GPS ウオッチの製品例を示す。センサとの無線通信は、2. 4GHz を利用している例が多い。アスリート系では、GARMIN 社と SUUNTO 社のものが多く使用されている。Polar 社のものには心拍を取れる製品もある。EPSON 社製はピッチの測定と心拍計測の両方が可能である。

表 3. 2-3 GPS ウオッチの製品例

項目	Garmin (ガーミン)	Suunto (スント)	Epson	Polar (ポラール)	Polar	オムロン	F-RUN
商品名	Forerunner e910XTJ	QUEST	SS-700T	RC3 GPS	Polar BEAT	HR-500U	HM00
形状	時計	時計	時計	時計	iPhone 連携	時計	時計
サイズ	54×61× 15mm	43×43× 13mm	厚さ15.7mm	39×45× 14mm		43×42× 18mm	
重量	72g	40g	61g	58g		35g	44g
動作時間	20時間		14時間	12時間		8時間	
電池	充電式 リチウム	CR2032	充電電池	Li-Pol 充電式 (250mAh)		充電式 リチウム (100mAh)	
センサ	GPS	○	別	○	○		
	HR(ハートレート)センサ	胸 ストラップ	胸 ストラップ	胸 ストラップ	胸 ストラップ	手首	指先で タッチ
	センサとの通信	ANT+ (2.4GHz)	ANT+ (2.4GHz)	ANT+ (2.4GHz)	2.4GHz W.I.N.D	Bluetooth	-
PCとの接続	ANT、USB ステック	USB ステック	クレードル	USB			
価格	¥49,800	¥18,900	¥34,800	¥27,500	¥8,000	¥14,800	¥10,000

(5) 東京マラソンからの提言の例

心拍停止事故は、レース後半に集中している。フィニッシュ時の事故が多い。応援が多く、がんばりすぎるためであると思われる。

3.3 まとめ

3.3.1 ヒアリング結果のまとめ

マラソンとウォーキングに関するヒアリング結果をまとめる。センサとしては、脈波、血圧、体温、加速度、位置（GPS 情報）が考えられる。これらのセンサに必要な計測周波数とデータ長、データの個数、データ伝送速度を表 3.3-1 に示す。今回の実証実験では、センサとして実績のある脈波、加速度、位置情報を取得できるようにする。

表 3.3-1 センサ情報に必要な伝送速度

センサ	計測周波数 (Hz)	データ長 (bit数)	個数/軸数	伝送速度 (bps)
脈拍	16～20	10	1	160～200
血圧	1	10	1	10
体温	1	8	1	8
加速度	16～20	10	3軸(X,Y,Z)	480～600
位置	1	64	2軸 (緯度、経度)	128

以下、ウォーキングとマラソンでの利用シーンをまとめる。生体データを収集する基地局の設置方法として、基地局移動型と基地局固定型が考えられる。図 3.3-1 に示すように、ウォーキングの時は、基地局移動型（携帯型）と親和性が高く、マラソンの時は、基地局固定型が良いと思われる。ウォーキングの時は、世話人を含めて一定範囲内で、歩行することが考えられる。この場合には、世話人が基地局を携帯し、参加者は、センサを実装した移動局を携帯し、参加者のセンサ情報が世話人に集まる構成である。世話人は、参加者の健康状態、歩行の遅れの情報などをリアルタイムで把握できるようになる。

マラソンの場合には、走るルートが固定されるので、マラソンコースに基地局を設置できる。その基地局でランナーのセンサ情報をモニタリングできるようにする。特に事故が多いのがレースの後半の可能性が高いので、レースの後半に例えば 1km 間隔で基地局を設置し、これらの基地局の情報を携帯網などのネットワークで収集し、本部などでランナーの健康状態を把握することが可能となる。

なお、応用試験では、基地局に加えて、中継局でもランナーのセンサ情報を収集できることを確認した。中継局を使うことにより、無線のカバー範囲を容易に拡張できることも確認できている。詳細は応用試験の結果で述べる。

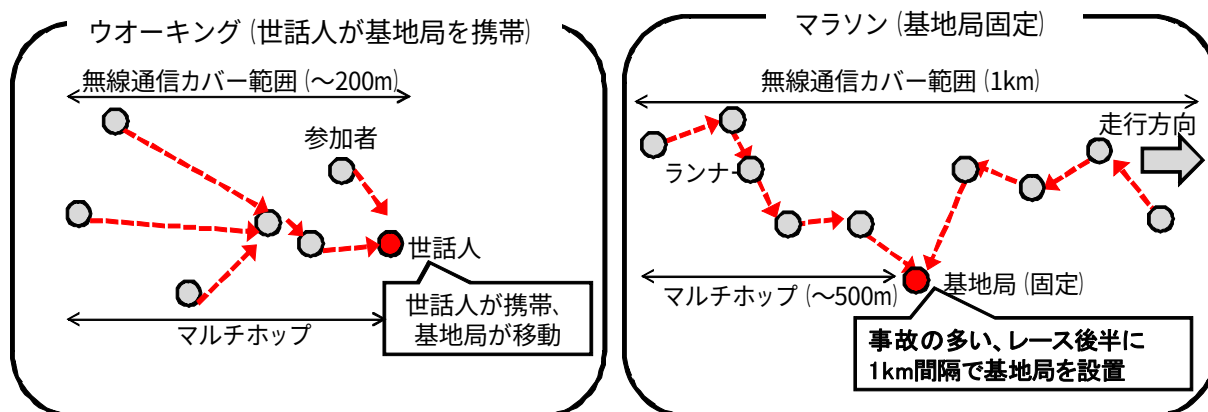


図 3.3-1 ウォーキングとマラソンでのシステム構成例

3.3.2 応用分野の検討

920MHz マルチホップの応用分野に関して、調査検討会で検討した内容は以下の通りである。

(1) マラソン

今回の応用試験で実際に装着してもらったランナーの感想は以下の通りある。無線機は付けていて気にならない。今回は無線機本体を腕に付けたが、腰（ポーチ）に付けても良いと思う。実用化時にはさらに小型化になると更に良い。

(2) ビックデータ応用

生体情報の生データをリアルタイムで収集して、クラウドにデータをアップし、データベース化できれば、生データを共有して、いろいろなアプリケーションで解析サービスを提供できる可能性がある。

(3) 家畜などの動物の管理

大きな牧場などで、牛、馬などに付けて動物の位置や健康状態を管理するような応用もある。

(4) 災害時の避難誘導

災害時に高齢者の避難の時に、高齢者に無線機を付けることにより、誰がどこにいて、どのような健康状態かモニタリングする応用もある。災害時に携帯網が使えなくても、マルチホップ通信でカバーできる。

[参考文献]

[3-1] 愛知県ウォーキング協会 <http://www.aichiken-walking.com/>

[3-2] マイクロトークシステムズ http://mts.greentag.to/index_j.html

[3-3] ホノルルマラソンのデータ <http://www.pseresults.com/events/488/results>

第4章 技術的条件及び通信方式の検討

4.1 技術的条件の検討

ウォーキングとマラソンの利用シーンのヒアリングを元にして、表 4.1-1 に技術的条件をまとめた。技術的条件は、移動局の移動速度、ネットワークの収容端末数、一台の基地局の通信カバー範囲、データ伝送速度である。マラソンにおける技術的条件が厳しいので、マラソンの技術的条件をベースに通信方式を検討する。

表 4.1-1 技術的条件のまとめ

仕様	・ウォーキング (団体歩行)	・ウォーキング (自由歩行) ・マラソン	備考欄
移動局の移動速度	～4Km/h	～18Km/h	
収容端末数(移動局)	～100台	～100台	・集団歩行では、先頭と最後尾の世話人が基地局を携帯すると想定。 ・ホノルルマラソンでは、30Km以降で同じラップタイムで走っている人は、100～150名程度。
一台の基地局のカバー範囲	～200m	～1Km	・集団歩行では、先頭から最後尾までの距離は、長くない ・マラソンの関門は5km間隔であるが、後半ゴールの近くでの事故が多いことを考えると、ゴール近くで1km間隔に基地局を設置することを想定。
データ伝送速度 (バイタルセンサ分)	736bps/台	736bps/台	・移動局の収容台数を100台と想定すると、74kbps(データのみ)の伝送速度が必要。

4.2 通信方式の検討

920MHz 帯マルチホップの通信方式に関して検討する。まずは、ネットワークのトポロジーに関して検討する。表 4.2-1 にネットワーク構成の比較を示す。今回のアプリケーションは、マラソンのランナーに移動局を装着する応用であり、無線端末が移動し、時々刻々とネットワークの構成が変わるアプリケーションである。仕様としては、ネットワークのカバー範囲が広い方式、複数台の移動局からの生体センサ情報をリアルタイムで伝送するためスループットの高い方式、移動局が電池で動作するためネットワークのルーティング制御が簡易でオーバーヘッドが少ない方式が要求される。本仕様を検討した結果、本仕様に適したツリー型方式を選択した。多重化方式としては、TDMA (Time Division Multiple Access) を選択し、センサ情報のリアルタイム伝送とスループットを確保できるようにした。

表 4. 2-1 ネットワーク構成の比較

ネットワークの構成	スター型	メッシュ型	ツリー型
多重化方式	TDMA	CSMA	TDMA
スループット	△ 高精度の時刻同期が必要	× パケットが衝突した場合の性能が推定困難	△ 高精度の時刻同期が必要
無線通信距離	× 移動局の送信電力が増大	○	○
ネットワークのオーバーヘッド	○	× 移動局の場合、ルート情報更新のオーバーヘッド大	△ ルート情報は半固定

図 4. 2-1 にツリー型マルチホップ方式の-slotの構成とその通信手順を示す。slotは、ビーコンの送信slotとセンサ情報の送信slotから構成される。ビーコンの送信手順は以下の通りである。まず、基地局からビーコンを送信する。ビーコンを受信した移動局は、ランダム時間待ち、その後キャリアセンスして、ビーコンを送信する。ビーコン送信に成功した移動局は、以降ビーコンを送信しない。ビーコンを送信できなかった移動局は再度ビーコンの送信を試みる。このようなビーコンの中継伝送をマルチホップの段数分繰り返す。ビーコンが中継されたルートを各移動局は保持する。センサ情報は、このビーコンが伝送されるルートと逆方向でセンサ情報を送信する。

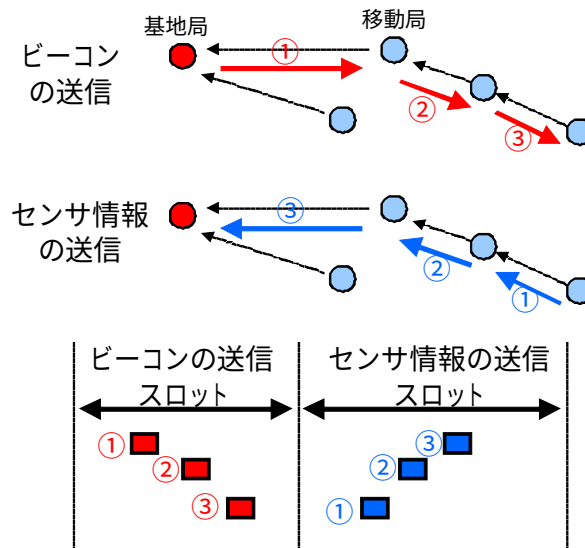


図 4. 2-1 ツリー型マルチホップのslot構成と通信手順

表 4. 2-2 にツリー型マルチホップ方式の仕様を示す。センサのデータ量は、92 バイト、センサ送信の packet サイズは、139 バイトとした。データ伝送時のオーバーヘッドとして、送信前のキャリアセンス時間、受信から送信への切替時間、packet の中継処理時間を想定する。ビーコン信号伝達時間（ビーコンの送信slot時間）は、100ms とした。

表 4.2-2 ツリー型マルチホップ方式の仕様

項目	条件
1回の送信のデータ量	92バイト ((脈拍+3軸加速度情報) × 16回 + GPS位置情報)
送信パケットサイズ	139バイト
送信前キャリアセンス時間	128 μ 秒
受信→送信切替時間	138 μ 秒
中継処理時間	1m秒
ビーコン信号伝達時間	100m秒
想定する転送ルート	ワーストケースを想定

図 4.2-2 にツリー型伝送のネットワーク構成におけるスループットの比較を示す。スループットのベストケースは、(1)に示すように、移動局が直接基地局と接続している場合である。この場合、センサ情報の送信スロットは、移動局の台数分で良い。ワーストケースは、(2)に示すように、基地局にマルチホップ段数分の移動局がシリアルに接続し、最終段の移動局に残りの移動局が接続する場合である。移動局の台数が多い場合、センサ情報の送信スロットは、移動局 × マルチホップ段数分必要になる。

920MHz マルチホップシステムで、50～100 台の移動局を収容するためには、ワーストケースのネットワーク構成を想定すると、センサ情報のデータ伝送速度は、

50 台の時 約 300kbps (278kbps=139 バイト × 8 ビット × 50 台 × 5 ホップ)

100 台の時 約 600kbps (556kbps=139 バイト × 8 ビット × 100 台 × 5 ホップ)

が必要である。

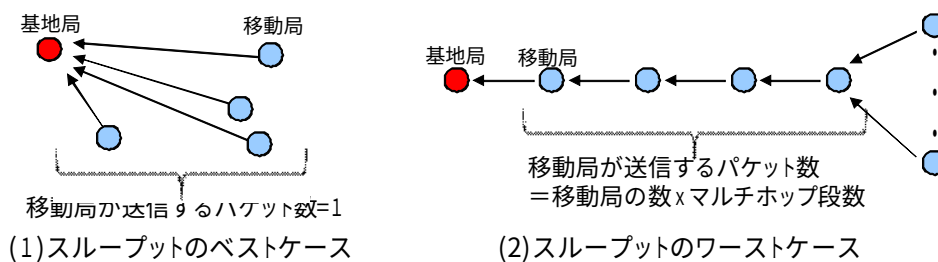


図 4.2-2 ツリー型伝送のネットワーク構成におけるスループットの比較

このスループットを実現するための変調方式を検討する。表 4.2-3 に変調方式と伝送速度の比較を示す。変調方式は、2FSK、または 4FSK である。920MHz の 1 チャネル当たりの物理層の伝送速度は 100kbps であり、目標のデータ伝送速度を実現するためには、3～5 チャネルを束ねる必要がある。

表 4.2-3 変調方式とデータ伝送速度の比較

方式	変調方式	伝送速度 (物理層)	占有するチャンネル数
案1	4FSK	1Mbps	5
案2	2FSK	500kbps	5
案3	4FSK	500kbps	3

マラソンに応用する場合のビーコンの送信周期に関して検討する。図 4.2-3 に基地局のカバーする通信範囲を示す。通信範囲を半径 100m とし、移動局がそのエリアを通過期間に、何回ビーコンを受けられるかを評価する。図 4.2-4 に移動局の移動速度とビーコン周期の関係を示す。マラソンのランナーの速度は 5m/秒以下（時速 18Km 以下）と想定する。基地局のカバーする通信範囲内で、移動局が受信するビーコンの回数を 3 回以上必要であると想定すると、ビーコンの周期は 10 秒以下にする必要がある。

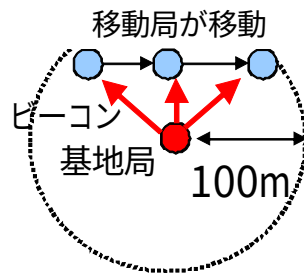


図 4.2-3 基地局のカバーする通信範囲

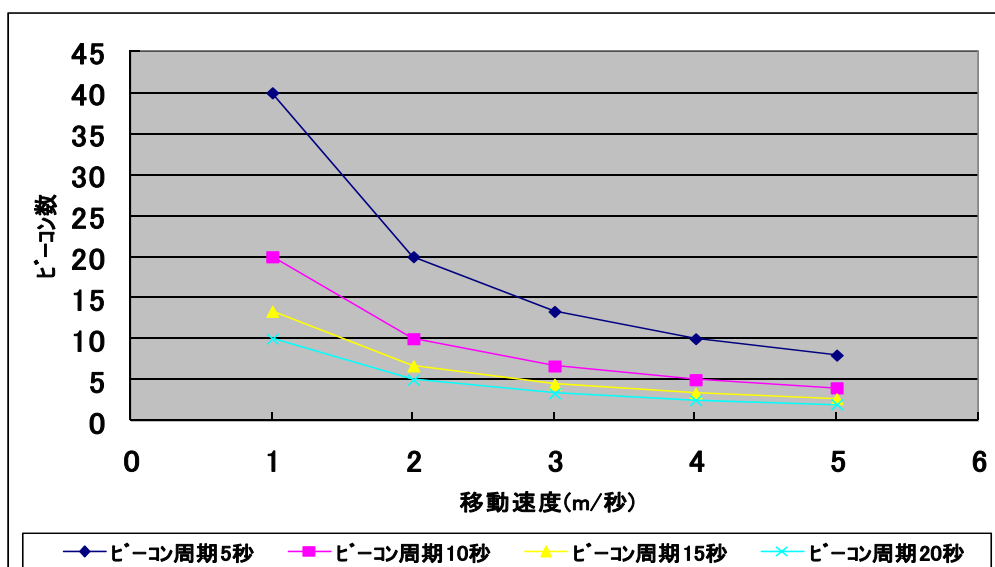


図 4.2-4 移動局の移動速度とビーコン周期の関係

ビーコンの送信からセンサ情報の収集が完了するまでの時間と、ネットワークに収納できる移動局の

台数を評価する。図 4.2-5 にデータ伝送速度 1Mbps の場合の移動局の台数とセンサ情報収集時間の関係を示し、図 4.2-6 にデータ伝送速度 500Kbps の場合のグラフを示す。センサ情報の収集完了時間が 1 秒以内であれば、リアルタイムでの収集が可能である。1Mbps の場合には、平均 3 ホップであれば、移動局 100 台を接続できる可能性がある。500kbps の場合には、平均 3 ホップ数であれば、移動局 70 台を接続できる可能性がある。なお、本評価では、マルチホップの packets 伝送時間は含まれているが、再送 packets のための伝送時間は含まれていない。

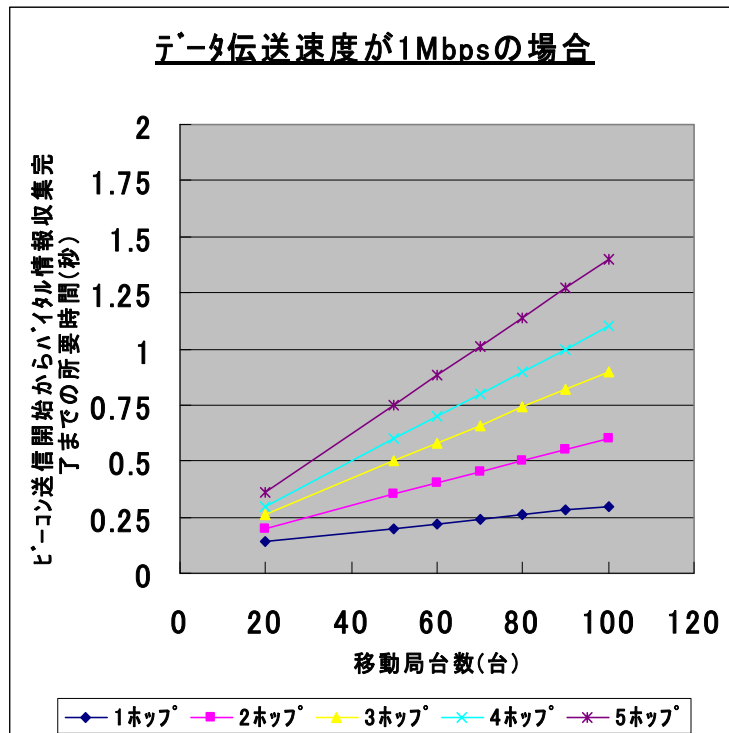


図 4.2-5 伝送速度 1 Mbps の場合のデータ伝送時間と移動局の台数の関係

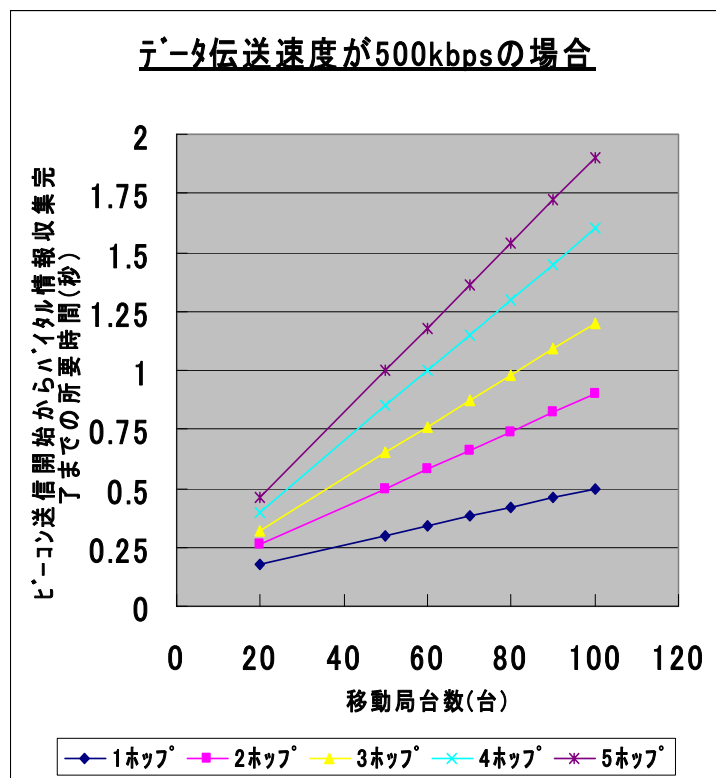


図 4. 2-6 伝送速度 500Kbps の場合のデータ伝送時間と移動局の台数の関係

表 4. 2-4 に変調方式における伝送距離の比較結果を示す。本伝送距離は見通しの場合の通信距離である。変調方式 2FSK で、伝送速度 500Kbps の場合が最も通信距離が長くなる。

表 4. 2-4 変調方式における送信電力と伝送距離の関係

送信電力 (mW)	送信電力 (dBm)	移動局間伝送距離 (m)		
		案1 4FSK-1Mbps	案2 2FSK-500kbps	案3 4FSK-500kbps
20	13.01	285	415	360
10	10.00	245	350	305
1	0.00	135	195	170

図 4. 2-7 に外的要因による伝送距離の評価結果を示す。本結果は、送信電力が 20mW のものである。マルチパスや人体の影響（移動局を人に装着した時に人の陰になる）を受けた時の伝送距離を示す。マルチパスで 20dB, 人体の影響で 5dB のマージンが必要であると想定した。目標とする 100m の通信距離を確保するためには、2FSK-500Kbps の方式が適する。人体の影響に関しては、基礎試験結果で報告する。

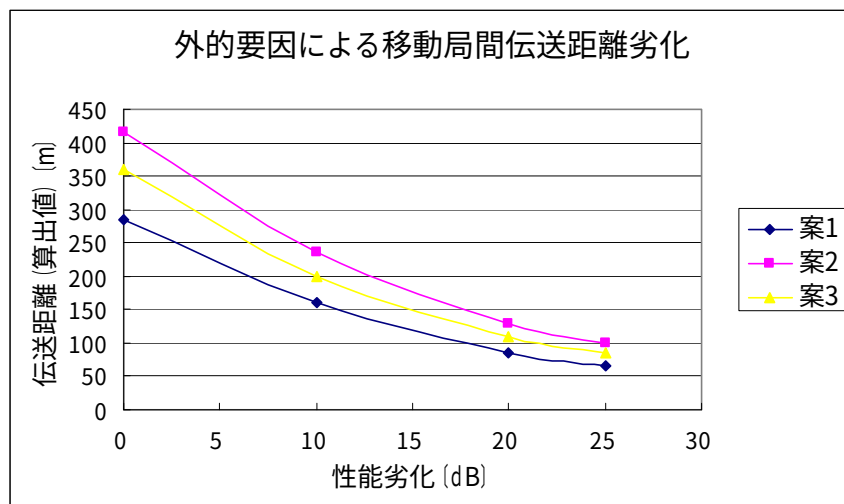


図 4.2-7 外的要因による伝送距離の評価

4.3 まとめ

表 4.3-1 に通信方式の検討結果をまとめる。2FSK-500Kbps と 4FSK-1Mbps の二つの案があるが、今回の試作機は、通信距離を優先し、2FSK-500Kbps の方式を採用して試作するものとする。

表 4.3-1 通信方式の仕様まとめ

項目	機能
伝送速度(物理層)	500kbps/1Mbps
変調方式	2FSK/4FSK
収容端末数	～100台
ホップ数	～5ホップ
通信距離	約100m/1ホップ、約500m/5ホップ

表 4.3-2 に 920MHz 帯の特定小電力無線局の概略仕様 (ARIB STD-T108) を示す^[4-1]。920MHz マルチホップシステムでは、生体センサ情報などの生データを伝送する必要がある。例えば、ネットワーク構成が図 4.2-2 の (2) のように、特定の移動局に伝送データが集中するような場合には、ARIB STD-T108 の規格の中で、送信時間の総和時間の制限 (1 時間当たりの送信時間が 360 秒以下) が問題となる可能性がある。また、パケットサイズに関しては、送信制限時間 (表の一番下の行の送信制限時間 2ms 以下、休止時間なし) が問題となる可能性がある。本件に関しては、試作機の製作にて報告する。

表 4.3-2 920MHz 帯の特定小電力無線局の概略仕様 (ARIB STD-T108)

出力	CH番号	単位CH 帯域	同時使用 CH	キャリア センス 時間	送信制限時間	休止時間	送信時間 総和 (1時 間当たり)	キャリアセンス除外の応 答条件	
								完了時間	開始時間
1mW以下	1～5	200KHz	1～5	なし	100ms以下	100ms	3.6秒 以下	—	—
	62～77	100KHz	1～5		50ms以下	50ms	なし	—	—
20mW 以下	24～38	200KHz	1～5	5ms以上	4s	50ms	なし	—	—
	33～61	200KHz	1	128us 以上	200～ 400ms	送信時間 の10倍	360 秒以下	50ms 以下	2ms 以下
					6～200ms	2ms			
					～6ms	なし			
			2		3～200ms	2ms		5ms 以下	
					～3ms	なし			
			3～5		2～100ms	2ms			
					～2ms	なし			

[参考文献]

[4-1] 920MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 標準規格

ARIB STD-T108 1.0 版 第 2 編 特定小電力無線局 (発行：一般社団法人 電波産業会)

第5章 試験機の製作

本章では、技術試験使用する試作機の機能および性能について述べる。本システムは基地局、移動局、制御用 PC で構成される。図 5-1 にシステム構成図を示す。基地局は、920MHz 帯のマルチホップネットワークの同期を取るために 1 秒周期でビーコンを送信する。移動局は、このビーコンを受信後、ビーコン信号を再送する。このビーコンの再送ルートがマルチホップのルート情報となる。各移動局は、ビーコンが再送されるルートを記憶し、そのルートをさかのぼるようにセンサ情報を送信し、センサ情報を基地局まで伝送する。マルチホップは、5 ホップまで可能である。基地局に接続できる移動局の台数は 50 台である。

移動局には、デンソー社が試作した腕時計型脈波センサが接続される。腕時計型センサには、脈波センサと 3 軸の加速度センサが実装されている。これらのセンサ情報と、移動局本体に実装された GPS モジュールが検知する位置情報を 920MHz 帯のマルチホップ無線通信で基地局に伝送する。

基地局は、移動局から送信されたセンサ情報、ルート情報、無線通信品質情報（RSSI）を有線 LAN 経由で PC に転送する。PC は、センサ情報などのデータをログデータとして蓄積する。

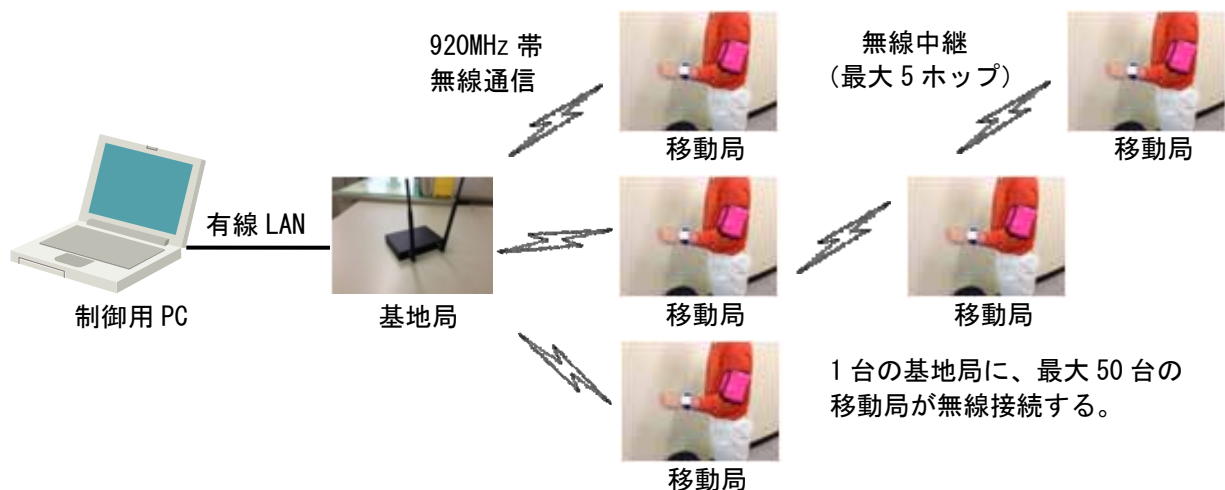


図 5-1 システム構成図

5.1 基地局の構成

基地局の機能および性能に関して説明する。 -

5.1.1 基地局の一般仕様

基地局の一般仕様を表 5.1.1-1 に示す。基地局の機能として、LAN モジュールを用いた LAN 通信機能があり、制御用 PC と接続し、920MHz 帯無線通信で取得した移動局のログデータを収集、蓄積する。また、電源は AC アダプタを使用するが、マラソンなどでの技術試験を想定して、CR123A 等のバッテリー駆動も可能である。

表 5.1.1-1 基地局の一般仕様

項目	試作機仕様
中央処理装置 (CPU)	16bit-CPU、動作周波数：19.6608MHz
保持するメモリ容量	ROM：512KB、RAM：32KB
電源	ACアダプタを使用したAC100V駆動 ・動作電圧範囲：AC100±10% ・動作周波数：50/60Hz ±5% ・消費電力：3.0W以下（想定） ※外部バッテリー駆動も可能 ・動作電圧範囲：DC4.5～7.0V ・消費電流：250mA程度 ・外部バッテリー一例：CR123A-2直3並列 ・電池寿命：約5時間（+5℃環境下、DC4.5Vまで使用）
無線通信機能	“基地局無線仕様”参照
外部インターフェース	LANインターフェース搭載 （LANモジュール“XP1001000-04R”使用）
表示機能	・送信LED：無線送信時点灯 ・受信LED：無線電文受信時点灯 ・無線CH設定SW：データ伝送速度=500kbps時で4CH設定 ・電源SW：機器メイン電源ON/OFF切替 ・操作SW：押ボタン（未使用）
操作機能	・無線CH設定SW：データ伝送速度=500kbps時で4CH設定 ・電源SW：機器メイン電源ON/OFF切替 ・操作SW：押ボタン（未使用）
使用温度範囲	0～40℃
筐体	・機器サイズ：159mm×115mm×29.5mm（アンテナ含まず） ・アンテナ：214mm×φ12.5mm ・機器重量：約650g（機器本体のみ） ・金属ケース使用（黒色）

5.1.2 基地局の無線仕様

基地局の無線仕様を表 5.1.2-1 に示す。無線回路は、500kbps（2 値 GFSK 変調時）の高速データ伝送速度に対応した RF-IC「Si4461（シリコンラボ製）」^[5-1]を用いて構成した。基地局の機能として、マルチパスフェージング等の影響により数秒間以上連続で無線通信の失敗を回避するため、2 本のアンテナを使用し 1 秒周期（ビーコンの送信周期）で使用アンテナを切り替えるダイバーシティ機能を実装した。

表 5. 1. 2-1 基地局の無線仕様

項目	試作機仕様
適用無線規格	ARIB STD T108 準拠
使用無線IC	シリコンラボ製:「Si4461」使用
無線周波数	下記4周波から選択 ①922.8MHz ②923.8MHz ③924.8MHz ④925.8MHz
送信電力(空中線電力)	20mW以下で可変
空中線形式	外付けヘリカルアンテナを2本取り付け、ダイバーシティ化(回路的に1秒毎に使用アンテナを切り替える)
データ伝送速度	500kbps(周波数帯域幅 1MHz)
変調方式	2値GFSK
占有チャネル数	5チャネル
キャリアセンス時間 キャリアセンスレベル	・キャリアセンス時間 : 128 μ s以上 ・キャリアセンスレベル: -80dBm以下
送信時間・休止時間	・送信制限時間 : 2ms単位で設定 ・送信休止時間 : 2ms単位で設定 ・送信時間総和 : 360s以下
通信距離	・移動局間距離 : 100m以上 ・基地局通信範囲(5ホップ時) : 500m以上
収容(接続)端末数	・50台 ※5ホップ通信動作と要求通信距離:500mの実現を重視して、上記収容台数とする

5. 1. 3 基地局の概観図

基地局の概観図を図 5. 1. 3-1 に示す。アンテナはダイバーシティ構成である。

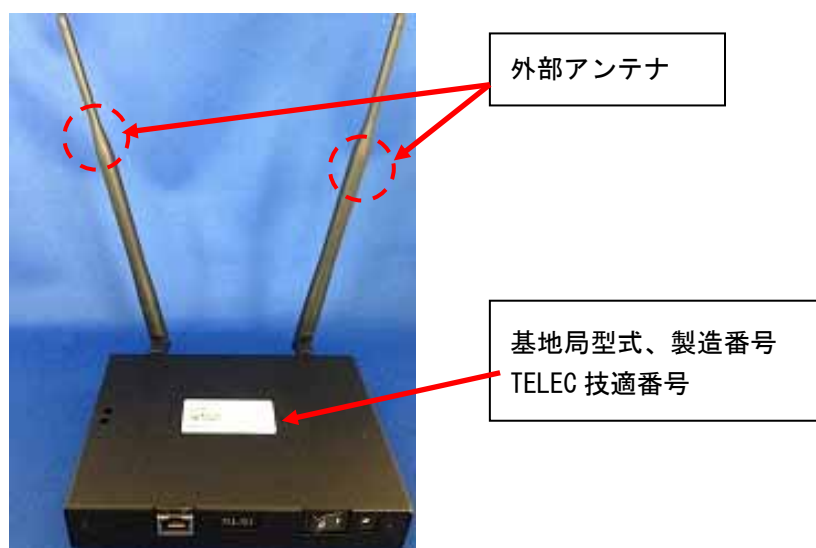


図 5. 1. 3-1 基地局外観図

5.2 移動局の構成

移動局の仕様を以下に示す。-

5.2.1 移動局の一般仕様

移動局の一般仕様を表 5.2.1-1 に示す。移動局は、デンソー社の試作品の腕時計型脈波センサを接続することができる。本センサが計測した脈波データと3軸加速度データを取得し、920MHz 帯無線通信で基地局に伝送する。また、GPS モジュールを内蔵することで、移動局の位置情報をリアルタイムで伝送することができる。マラソンでの技術試験が雨天の場合も想定して、防水（防沫）構造を採用した。

表 5.2.1-1 移動局の一般仕様

項目	試作機仕様
中央処理装置（CPU）	16bit—CPU、動作周波数：19.6608MHz
保持するメモリ容量	ROM：512KB、RAM：32KB
電源	内蔵電池駆動 ・使用電池：円筒型リチウム電池“CR2”2直列 ・動作電圧範囲：DC3.4～6.5V ・動作時消費電流：typ. 110mA ・電池寿命：約6時間 （+5℃環境下、DC3.4Vまで使用した場合の想定値）
無線通信機能	“移動局無線仕様”参照
接続センサ機器	デンソー社製腕時計型脈波センサを使用 ※DC3.3V—UART接続（通信速度：9600bps）
GPS	・GPS機能（GPSモジュール：NEO-6Q-0-001）内蔵
表示LED	・送信LED：電源ON時、無線送信時点灯
操作SW	・無線CH設定SW：データ伝送速度=500kbps時で2通りの無線周波数設定 ・電源SW：機器メイン電源ON/OFF切替 ・テスト動作SW：機器テスト動作（無線特性測定等）用SW
使用温度範囲	0～45℃
筐体	・試作樹脂（ウレタン）ケース使用 ・サイズ（単位mm）：120x65x22.7（脈波センサ含まず） ・重量：約100g（電池含む） ・その他の特記事項 ①雨天での使用を想定した防水（防沫）構造 防水性を担保するため、下記の操作は上ケースを外して行う。 a:各種SW操作、設定 b:送信LED表示確認 ②振動対策として、電池はコネクタ付き型を採用

5.2.2 移動局の無線仕様

移動局の無線仕様を表 5.2.2-1 に示す。基地局と同じ無線回路構成を採用しているため基本的な仕様は同じである。ただし、移動局は、技術試験のために、ARIB STD-T108 の標準規格の中で、「キャリアセンス時間」、「キャリアセンスレベル」、「送信休止時間」及び「送信時間総和」について任意の設定をできるようにした。

表 5. 2. 2-1 移動局の無線仕様

項目	移動局仕様
適用無線規格	ARIB STD T108をベース
使用無線IC	シリコンホ`製:「Si4461」使用
無線周波数	下記2通りの組み合わせで、2周波切換動作を行う。 ①922.8MHz／924.8MHz切換 ②923.8MHz／925.8MHz切換
送信電力(空中線電力)	20mW以下で可変
空中線形式	内蔵パターンアンテナ
データ伝送速度	500kbps(周波数帯域幅 1MHz)
変調方式	2値GFSK
占有チャネル数	5チャネル
キャリアセンス時間 キャリアセンスレベル	・キャリアセンス時間 : 128 μ s ・キャリアセンスレベル : -80dBm 但し、実験試験局申請上は、『キャリアセンス時間』及び 『キャリアセンスレベル』の制限なし
送信時間・休止時間	『送信休止時間』及び『送信時間総和』の制限無し
通信距離	・移動局間距離 : 100m以上 ・基地局通信範囲(5ホップ時) : 500m以上
マルチホップ段数	・最大5ホップ可能

5. 2. 3 移動局の外観図

移動局の概観図を図 5. 2. 3-1 に示す。小型のケースに收容し、腕に取り付けられるような実装である。また、脈拍センサとの接続コネクタも用意している。

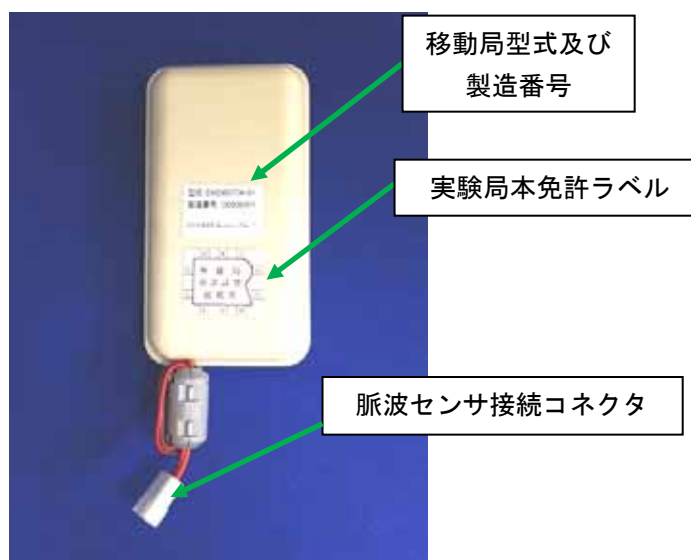


図 5. 2. 3-1 移動局外観図

5.3 無線動作仕様

5.3.1 通信手順

図 5.3.1-1 に本試作機におけるビーコン信号とセンサ情報の伝送方法を示す。基地局は、移動局に対して 1 秒毎にビーコン信号を送信する。基地局からのビーコン信号を受け取った移動局はビーコン信号を再送する。ビーコンを移動局間で再送した経路が、マルチホップの伝送経路になる。また、この経路をさかのぼるように移動局はセンサ情報を転送し、基地局まで届ける。

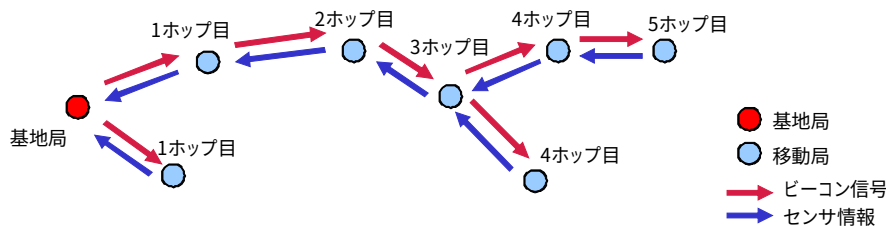


図 5.3.1-1 信号の伝送

このようなマルチホップの転送制御を行うスーパーフレーム構成を図 5.3.1-2 に示す。スーパーフレームは、基地局からのビーコン信号を移動局に伝送するためのビーコン信号伝達区間と、移動局からのセンサ情報を基地局まで伝送するためのセンサ情報伝達区間から構成される。

ビーコン信号伝達区間は 5 個の-slot から構成される。slot 1 は基地局がビーコン信号を送信する slot である。slot 2 は 1 ホップ目の移動局がビーコン信号を中継するために使用する slot である。slot 3 は 2 ホップ目の移動局がビーコン信号を中継する slot である。同様に、slot 4 は 3 ホップ目の移動局用、slot 5 は 4 ホップ目の移動局用である。slot 2～slot 5 では、複数の移動局が同時にビーコンを送信しないように、各移動局がランダム時間遅延後、キャリアセンスしてビーコンを送信するようにした。

センサ情報伝達区間は 50 個の slot から構成される。各 slot に 50 台の移動局が割り当てられる。slot 1 は移動局 1 のセンサ情報を送信する slot、slot 2 は、移動局 2 のセンサ情報を送信する slot である。同様に、slot 50 まで割り当てられている。

センサ情報伝達区間の各 slot は、さらに 5 個の slot から構成される。最初の slot はその slot に割り当てられた移動局が計測したセンサ情報のパケットを送信する slot、2 個目の slot は、そのパケットが 2 ホップ目の転送に利用される slot、3 個目の slot は、3 ホップ目の転送に利用される slot、同様に 4 個目、5 個目がそれぞれ、4 ホップ目、5 ホップ目の転送に利用される slot である。

ホップ数が少ない移動局の場合には、前半の slot だけでセンサ情報を基地局まで伝送でき、後半の slot が空き slot となる。例えば、2 ホップ目の移動局がセンサ情報を送信する場合は、センサ情報伝達区間の最初の 2 個の slot のみ使用される。残りの 3 個の slot は空き slot となる。この空き slot を、センサ情報を再送するために利用する。再送処理に関しては別途説明する。

次に、各 slot の転送時間について説明する。表 5.3.1-1、表 5.3.1-2 にそれぞれビーコン信号、センサ情報のパケットフォーマットを示す。データ伝送速度を 500kbps として、伝送時間を検討した。

ビーコン信号の packet サイズは 74 バイトで、ビーコン信号の送信時間、キャリアセンス時間、RF-IC の受信から送信への切替時間を考慮すると、ビーコン信号伝達区間の 1 スロット伝送時間は 1.652ms 以上必要となる。

センサ情報の packet サイズは 155 バイトで、センサ情報送信時間、キャリアセンス時間、RF-IC の受信から送信への切替時間、センサ情報中継送信時間、中継処理時間を考慮すると、16.74ms 以上必要となる。本検討結果からスーパーフレームを 1,000ms、ビーコン信号伝達区間を 100ms (1 スロット当たり 20ms)、センサ情報伝達区間を 840ms (1 スロットあたり 16.8ms) とした。

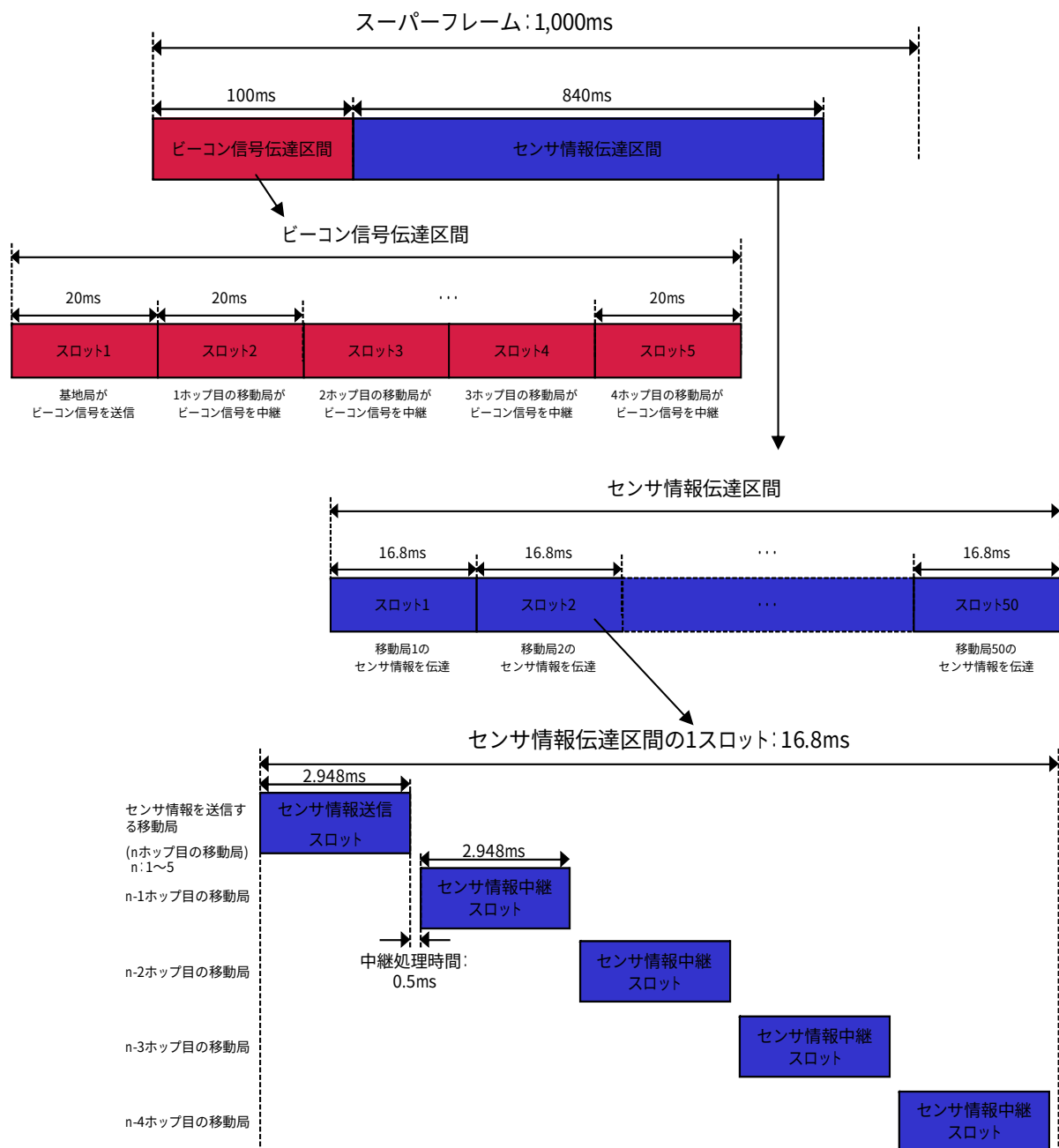


図 5.3.1-2 スーパーフレームの構成

表 5.3.1-1 ビーコン信号のフォーマット

項目	バイト数
ビット同期	45
フレーム同期	2
PAN ID	1
電文種別	1
送信元 ID	1
電文長	2
ホップした経路	5
再送制御情報	13
タイミング同期用情報	2
誤り検出符号	2
合計	74

表 5.3.1-2 センサ情報のフォーマット

項目	バイト数
ビット同期	45
フレーム同期	2
PAN ID	1
電文種別	1
宛先 ID	1
電文長	2
ホップした経路	5
センサ情報	96
誤り検出符号	2
合計	155

5.3.2 ビーコン信号の伝送

図 5.3.2-1 にビーコン信号送信スロットの構成を示し、詳細を説明する。一つのスロット時間は 20ms である。基地局は、最長 15ms(キャリアセンス区間)までキャリアセンスを行い、キャリアがない状態を検知するとビーコン信号の送信を行う。15ms まで待って、キャリアがない状態を検知することができなかつた場合はビーコン信号の送信をあきらめる。

ビーコン信号の再送を行う移動局は、信号衝突防止用のランダム時間経過後にキャリアセンスを行い、キャリアがない状態を検知するとビーコン信号の中継を行う。キャリアがあった場合は、再度信号衝突防止用のランダム時間経過待ちとキャリアセンスを繰り返す。最長 15ms まで待ってキャリアがない状態を検知することができなかつた場合はビーコン信号の中継をあきらめる。

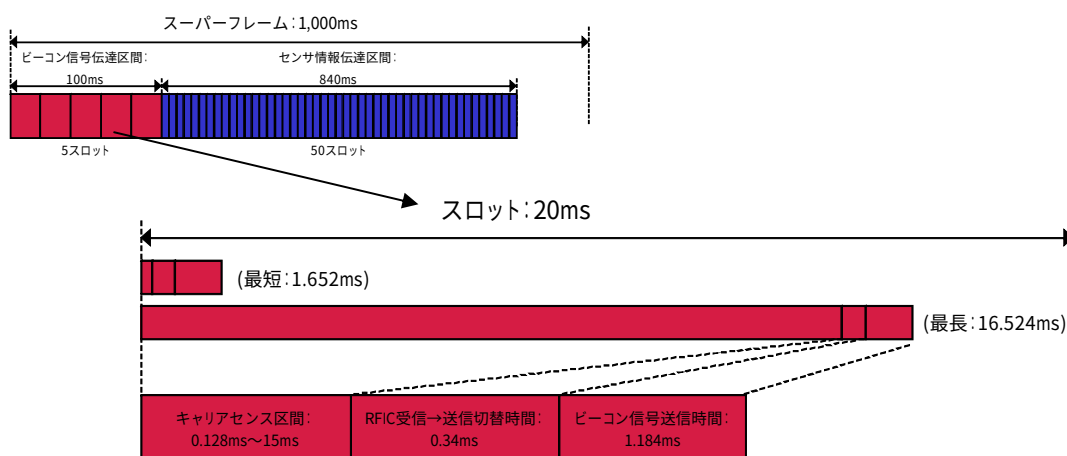


図 5.3.2-1 ビーコン信号送信スロットの構成

5.3.3 センサ情報の伝送

図 5.3.3-1～図 5.3.3-3 に 1 ホップ目、2 ホップ目、5 ホップ目の移動局がセンサ情報を伝送する場合のスロットの構成を示す。センサ情報はビーコン信号が伝送された経路をさかのぼって基地局に伝送される。

1 ホップ目の移動局 5 がセンサ情報を伝送する場合、スロット内の最初のスロットのみ利用される。

2 ホップ目の移動局 10 がセンサ情報を伝送する場合、スロット内の最初のスロットで、センサ情報を送信し、次のスロットは 1 ホップ目の移動局 5 がセンサ情報を中継するために使用する。

5 ホップ目の移動局 1 がセンサ情報を伝送する場合は、スロット内の全てのスロットが利用され、最初のスロットは、移動局 1 がセンサ情報を送信し、2 個目～5 個目のスロットは、移動局 3、移動局 50、移動局 10、移動局 5 がそれぞれセンサ情報を中継するために利用される。

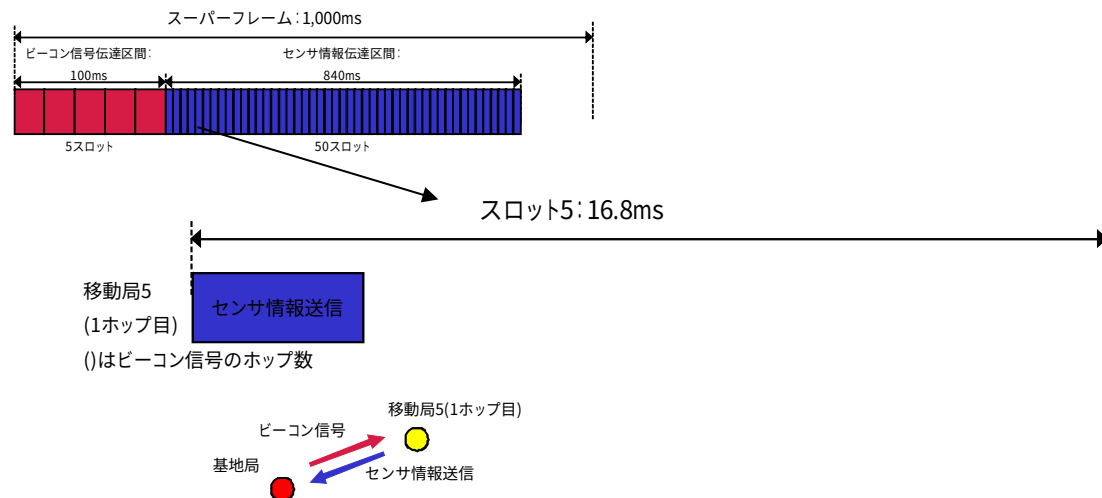


図 5.3.3-1 移動局 5 が 1 ホップ目の時のスロット 5 の構成

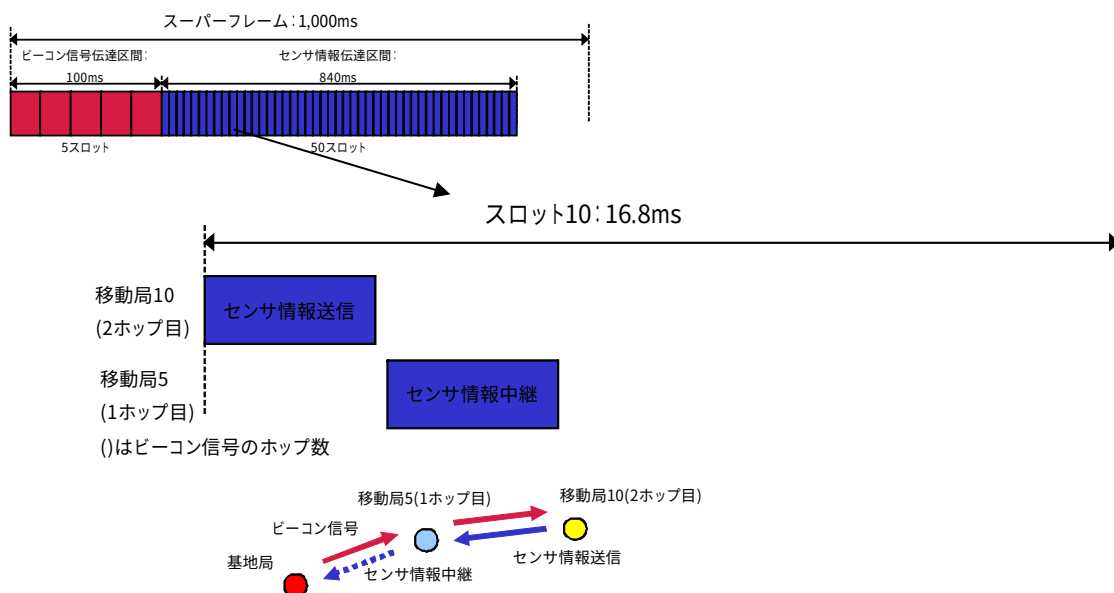


図 5.3.3-2 移動局 10 が 2 ホップ目の時のスロット 10 の構成
(ビーコン信号が移動局 5 から中継された場合)

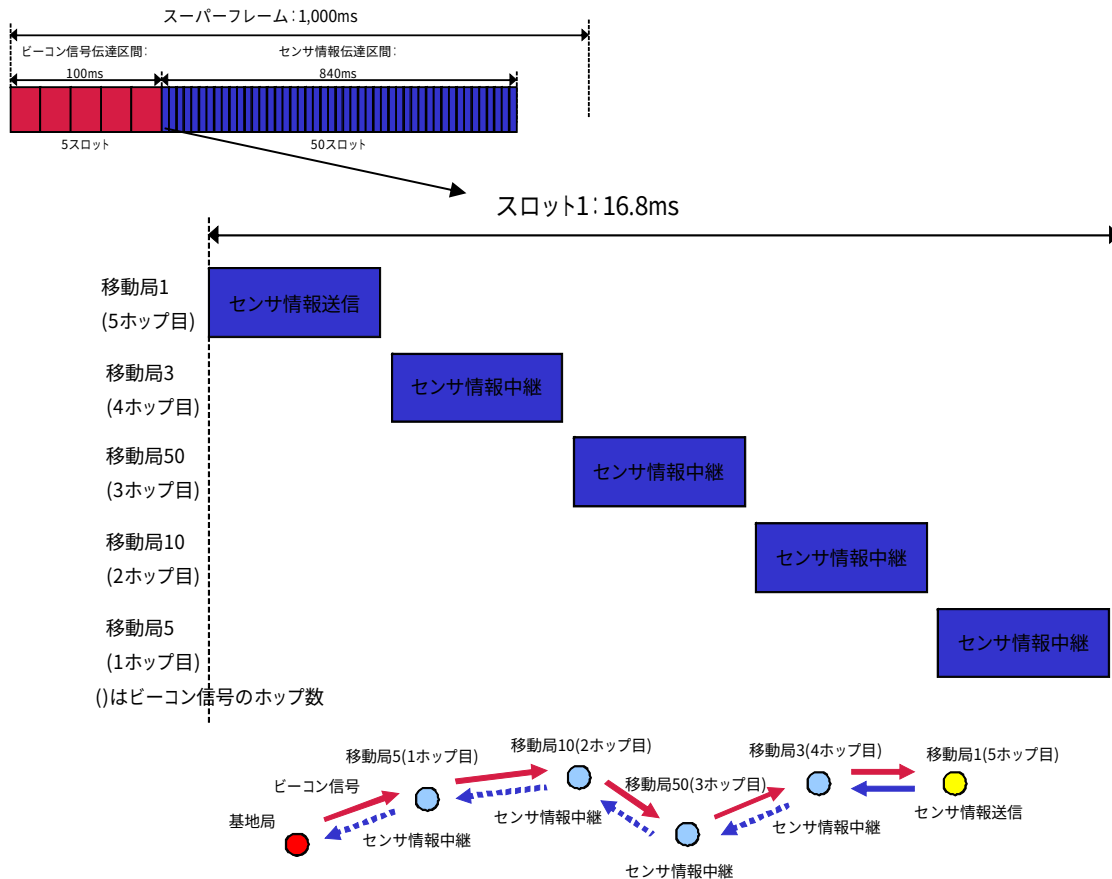


図 5. 3. 3-3 移動局 1 が 5 ホップ目の時のスロット 1 の構成
(ビーコン信号が移動局 5→移動局 10→移動局 50→移動局 3 と中継された場合)

図 5. 3. 3-4 にセンサ情報伝達区間内のセンサ情報送信とセンサ情報中継の詳細スロット構成を示す。センサ情報送信とセンサ情報中継のスロット構成は同じである。それぞれの packets は、キャリアセンス時間、受信から送信への切替時間、センサ情報送信時間から構成されている。センサ情報の伝送する前にキャリアを検出した場合、そのスロットでのセンサ情報の伝送をあきらめる。

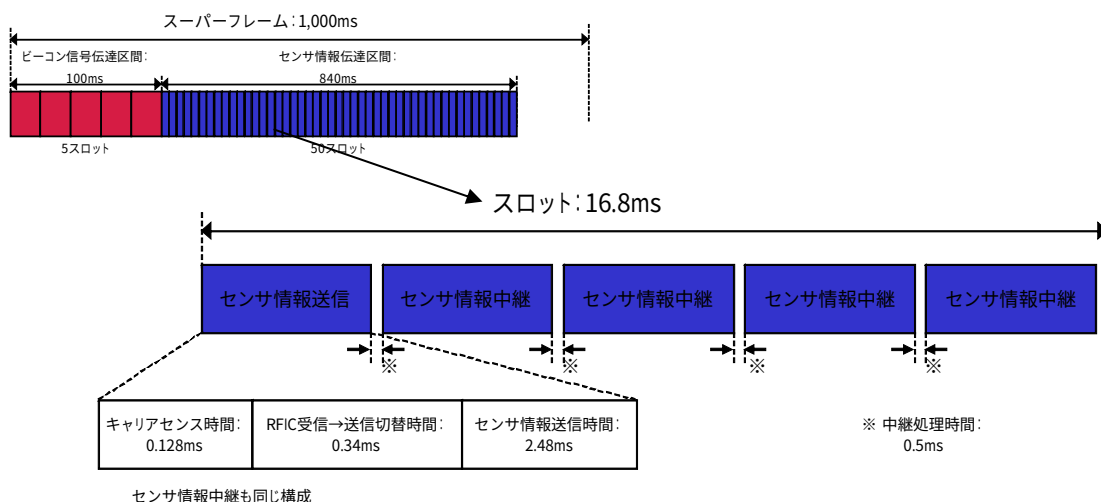


図 5. 3. 3-4 センサ情報送信とセンサ情報中継の構成

5.3.4 ビーコン信号の検索

本システムでは、基地局間でのフレーム同期は想定していない。このため、隣り合う基地局は別の周波数帯で動作することを前提としている。基地局 1、基地局 2 は、別の周波数のビーコン信号を送信する。移動局は、ビーコン信号を検索するために、2 つの無線周波数を切替えながらビーコン信号の検索を行う。移動局は 1 秒周期で周波数を切替ながらビーコンを検索する。

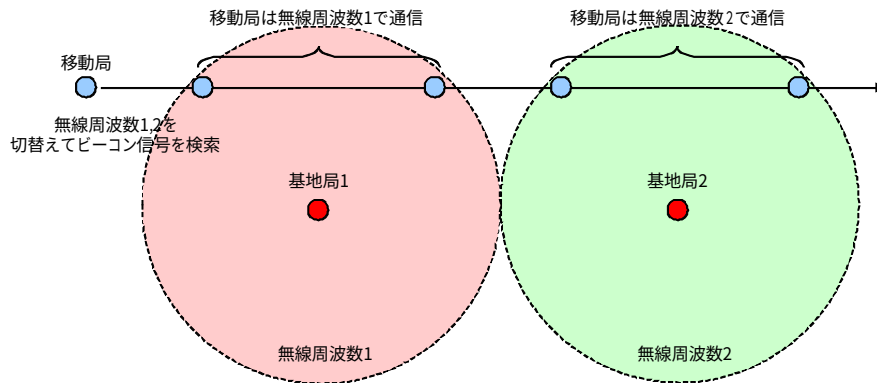


図 5.3.4-1 ビーコン信号の検索と無線周波数

ビーコン信号を受信した移動局は、図 5.3.1-2 のセンサ情報伝達区間が終了するまでビーコン信号を受信した無線周波数で通信を行う。センサ情報伝達区間が終了すると、移動局はキャリアセンス時間間隔で周波数を切り替えながら、基地局のビーコン信号の検索を行う。

5.3.5 センサ情報の再送制御

センサ情報を送信した移動局は、次のスーパーフレームのビーコン信号のフォーマットの再送制御情報を参照し、再送制御を行う。再送制御情報は、一つ前のパケットが基地局に届いたかどうかを示す ACK 情報（確認情報）である。

移動局は、センサ情報が基地局まで届いたことを確認し、移動局内に保持していたセンサ情報をメモリ上から削除する（図 5.3.5-1）。センサ情報が基地局まで届かなかった場合には、センサ情報を保持し、次のビーコン信号を受信したタイミングで再送する。また、ビーコン信号が受信できなかった場合も、移動局はセンサ情報をメモリ上に保持して次の伝送機会に再送する（図 5.3.5-2）。

センサ情報は最大 10 秒分（1 秒分のデータを 10 個）保持する。これを超える場合は、一番古いセンサ情報を削除し、新しいセンサ情報を保持する。

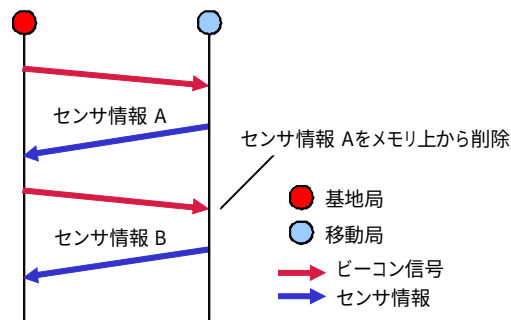


図 5.3.5-1 センサ情報が基地局に届いたことを確認できた場合

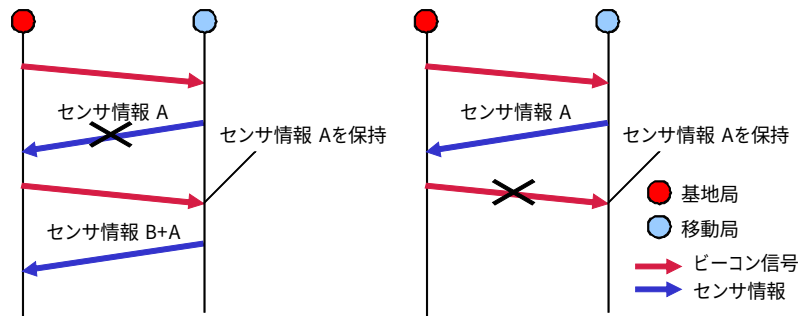


図 5.3.5-2 センサ情報が基地局に届かない場合とビーコン信号を確認できない場合

再送のためのセンサ情報を保持している場合は、次のセンサ情報の伝送タイミングで、最新のセンサ情報に、保持しているセンサ情報を付加してセンサ情報の送信を行う。これにより、過去のセンサ情報を再送できる。過去のセンサ情報を付加できる上限は、移動局に割り当てられているセンサ情報の通信のためのスロット時間で制限される。移動局が、マルチホップの段数が多い場所でネットワークに接続されている場合には、付加情報を送信できる時間的な余裕が無いが、マルチホップの段数が少ない時には、付加できる情報を送信できる時間を確保できる。

表 5.3.5-1 に移動局のマルチホップの段数と、付加できるセンサ情報数をまとめる。各移動局のセンサ情報を伝送するためのスロット時間は限られているため、ホップ数が少ないほど保持しているセンサ情報を多く付加して伝送することができる。

表 5.3.5-1 ビーコン信号のホップ数と保持しているセンサ情報の付加できる上限

ビーコン信号のホップ数	保持しているセンサ情報の付加できる上限
1 ホップ目	最新のセンサ情報+保持しているセンサ情報最大 8 秒分
2 ホップ目	最新のセンサ情報+保持しているセンサ情報最大 3 秒分
3 ホップ目	最新のセンサ情報+保持しているセンサ情報最大 1 秒分
4 ホップ目	最新のセンサ情報(保持しているセンサ情報は付加できない)
5 ホップ目	最新のセンサ情報(保持しているセンサ情報は付加できない)

ビーコン信号のホップ数が 1 ホップ目、3 ホップ目、4 ホップ目の場合のスロットの構成を図 5.3.5-3 ~ 図 5.3.5-5 に示す。移動局が 1 ホップで基地局と接続されている場合には、最大 8 秒分のセンサ情報を付加できる。移動局が 4 ホップで基地局と接続されている場合には、スロットに余裕がなく、保持しているセンサ情報を再送することはできない。

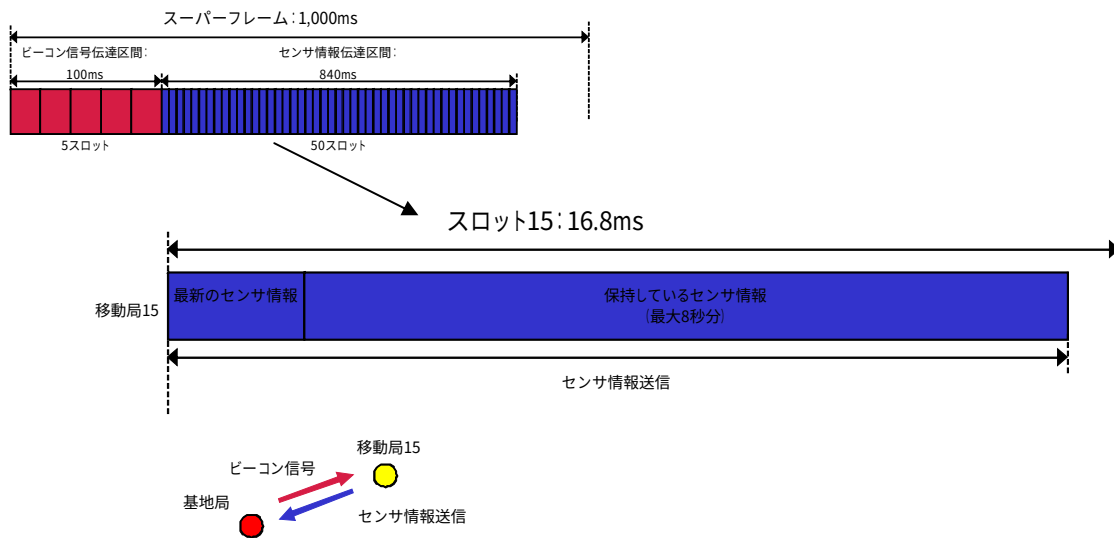


図 5.3.5-3 ビーコン信号のホップ数が1ホップ目の場合のセンサ情報の伝送

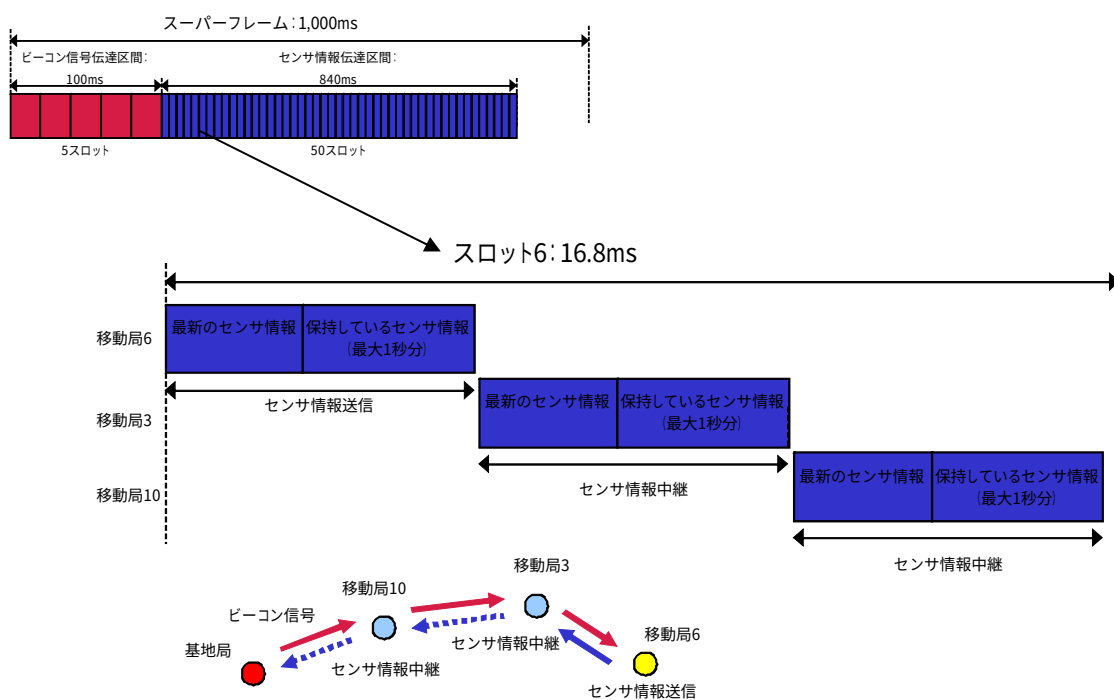


図 5.3.5-4 ビーコン信号のホップ数が3ホップ目の場合のセンサ情報の伝送

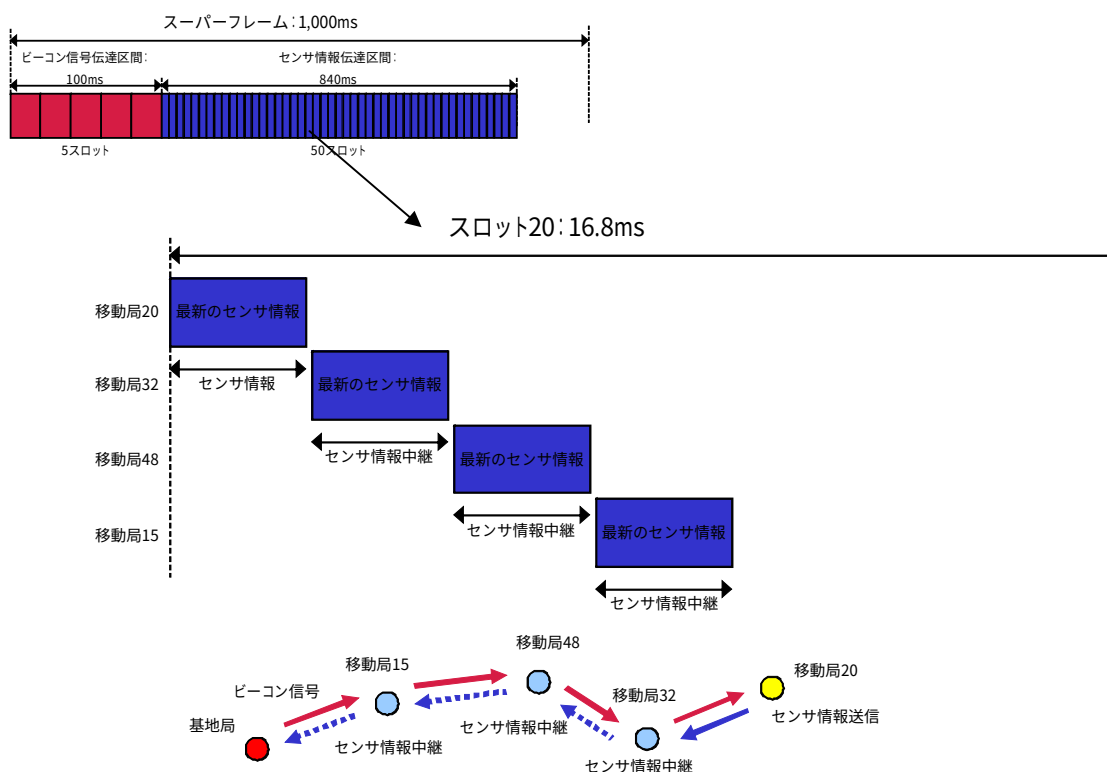


図 5.3.5-5 ビーコン信号のホップ数が4ホップ目の場合のセンサ情報の伝送

5.4 まとめ

本章で示した機器構成（仕様）と無線動作仕様に従い、基地局：2台、移動局：10台の試作機を製作した。

試作機の無線設備許可については、基地局は「証明規則第2条第1項第8号の無線設備-特定小電力機器」での技術基準適合証明（証明番号：001YYGA3004915～001YYGA3004916）、移動局は実験試験局-無線局免許状（免許番号：海実第2980号～海実第2989号、有効期間：平成26年3月31日まで）を取得した。

試作機の基本性能の評価結果については、『第6章 基礎技術試験』及び『第7章 応用試験』で説明する。

[参考文献]

[5-1] Si4461 のデータシート

<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4464-63-61-60.pdf>

第6章 基礎技術試験

6.1 試験内容

基礎技術の試験内容を以下に示す。

6.1.1 無線の基礎性能の評価内容

試作機の基本性能を確認するため、表 6.1.1-1 の試験を行い、その性能を評価する。

表 6.1.1-1 無線性能の試験内容

項目	試験内容（方法）
無線周波数	・スペクトラムアナライザを使用し、試作機をPN9（標準符号化試験信号）変調信号連続送信状態にして、無線周波数を測定する。
送信電力（空中線電力）	・スペクトラムアナライザを使用し、試作機をPN9変調信号連続送信状態にして、送信電力を測定する。
受信感度	・シグナルジェネレータを使用し、任意電文による変調信号を生成し、上記変調信号を連続受信状態の試作機に入力し、受信可能な最小信号レベルを測定する。
電界強度	・スペクトラムアナライザと標準ダイポールアンテナの組合せで、3m法による送信電界強度を測定する。
通信距離	・郊外を想定した試験環境で、伝送速度500kbpsにて、移動局-基地局間と2台の移動局間の限界通信距離を確認する。
PER	・基地局と移動局を無線信号減衰器を介して接続し、減衰量を可変させ、基地局-移動局間で無線通信動作を行い、通信成功率を確認する。

6.1.2 試作機の機能と性能評価

表 6.1.2-1 に基礎技術試験の試験項目をまとめる。試験項目としては、無線機の通信機能、マルチホップ動作の確認、スループット、伝送遅延時間、通信干渉、センサとの接続試験である。

表 6.1.2-1 試作機の機能と性能評価

項目	試験内容（方法）
送信機能／受信機能	・野外フィールドで、基地局－移動局間、及び2台の移動局間の無線通信動作を確認。
マルチホップ動作	・電文内にルート情報を埋め込み、制御用PCを使用して基地局が受信した電文からルートログを確認。（応用試験で実施する）
スループット	・擬似的に1台の基地局と50台の移動局の通信動作試験環境を構築し（システム上の最大負荷動作）、制御用PCで測定データを取得できるか確認する。
伝送遅延時間	・各スロットにおける無線通信動作について、スペクトラムアナライザを用いて送信タイミング実測し、設計値と比較評価する。
通信干渉試験	・920MHz帯の機器との干渉実験を行い、両方の機器の干渉の影響を確認する。 ・マラソンのタイム計測装置（125kHz、6.8MHzの無線信号を使用）と干渉の有無を確認する。（応用試験で実施する）
センサ情報取得	・移動局にデンソー社製腕時計型脈波センサを接続し、基地局との無線通信を介して制御用PCで所望の測定データが得られることを確認する。

6.2 無線の基礎特性の評価

電波法（測定方法：TELEC-T245^[6-1]）に基づき、移動局、基地局の基本特性を測定した。その測定結果を以下に示す。

6.2.1 使用計測器

無線特性の測定に使用した計測器を表 6.2.1-1 に示す。-

表 6.2.1-1 使用計測器

項目	品番	メーカー
スペクトラムアナライザ	MS2661A	Anritsu
スペクトラムアナライザ	RSA3303A	Tektronix
デジタルマルチメーター	R6441B	ADVANTEST

6.2.2 各試作機の基本特性

移動局 10 台、基地局 2 台の送信周波数、送信電力、受信感度の測定結果を表 6.2.2-1 に示す。移動局、基地局共に無線規格内に収まっていることを確認した。移動局は、実験試験局免許を取得した。基地局は技術基準適合証明を取得することとした。スプリアス発射強度を規格内に収めるために送信電力を下げた。それ以外は試作機間の個体差はなく、移動局、基地局の機種間の特性差も確認されなかった。

表 6.2.2-1 各試作機の基本特性

	送信周波数 [MHz]	周波数偏差 [ppm]	送信電力 [dBm]	受信感度 [dBm]
移動局No. 1	922.800075	0.08	12.12	-97.0
移動局No. 2	922.800370	0.40	12.50	-97.5
移動局No. 3	922.800101	0.11	12.25	-95.0
移動局No. 4	922.800226	0.24	12.49	-96.5
移動局No. 5	922.800536	0.58	12.21	-96.0
移動局No. 6	922.800242	0.26	11.96	-97.5
移動局No. 7	922.800332	0.36	12.26	-96.0
移動局No. 8	922.800147	0.16	11.88	-97.0
移動局No. 9	922.800447	0.48	12.17	-97.0
移動局No. 10	922.800294	0.32	12.31	-97.0
基地局No. 1	922.800089	0.10	11.33	-96.5
基地局No. 2	922.800274	0.30	11.18	-96.5

6.2.3 移動局の特性

移動局の伝送速度が 100kbps、500kbps、1Mbps での特性を測定した。伝送速度が 500kbps、1Mbps の場合には、占有チャネルが 5 チャンネルである。測定結果を表 6.2.3-1 に示す。伝送速度 100kbps では特性に問題なく規格内に入った。

伝送速度 500kbps では、915MHz～930MHz の帯域でスプリアス発射強度が規格値に対し余裕がなかった。これは伝送速度 100kbps に比べ、使用周波数帯幅が広がったことが要因である。これを回避する方法としては、送信出力を下げる、または周波数偏移を小さくする等の方法を取る必要がある。

使用周波数を 926MHz 以上にすると、930MHz～1GHz の帯域で規格値を超えてくる恐れがある。そのため 500kbps では、使用周波数を 922.8MHz、923.8MHz、924.8MHz、925.8MHz の 4 周波に限定した。

伝送速度 1Mbps では占有周波数帯幅、隣接 CH 漏洩電力、915MHz～930MHz 帯域のスプリアス発射強度が規格値を超えてしまう。占有周波数帯幅に関しては周波数偏移を下げることで規格内に収まると考えられるが、隣接 CH 漏洩電力及びスプリアス発射強度に関しては、RF-IC の性能に大きく依存しており、調整可能なパラメータも無いため今回の試作では採用を見送った。

表 6.2.3-1 移動局の無線特性

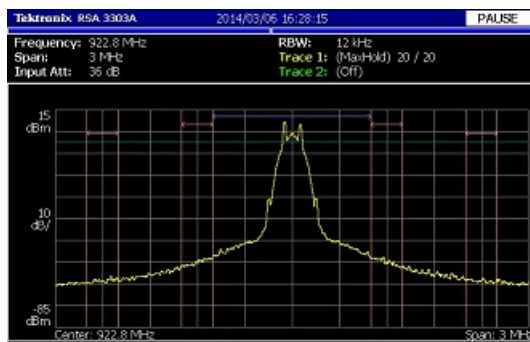
項目		単位	規格値	2値GFSK 伝送速度 : 100kbps 周波数偏移 : 50kHz	2値GFSK 伝送速度 : 500kbps 周波数偏移 : 125kHz	4値GFSK 伝送速度 : 1Mbps 周波数偏移 : 125kHz
【送信】						
送信周波数		MHz		922.800354	922.800332	922.800265
送信周波数偏差		ppm	±20	0.38	0.36	0.29
送信出力 20mW		dBm		12.12	12.26	12.20
占有周波数帯幅		kHz	≤1000	177.657	509.27	1068.33
隣接CH漏洩電力	Hi	dB	≤-15	-33.58	-28.35	-2.53
	Lo		≤-15	-33.41	-29.15	-2.35
スプリアス発射強度	710MHz以下	dBm	≤-36	-62.27	-63.26	-62.20
	710MHz～900MHz	dBm	≤-55	-61.78	-61.91	-61.59
	900MHz～915MHz	dBm	≤-55	-69.51	-68.39	-65.59
	915MHz～930MHz	dBm	≤-36	-39.15	-36.21	-14.78
	930MHz～1GHz	dBm	≤-55	-64.43	-62.94	-67.17
	1GHz～1.215GHz	dBm	≤-45	-66.16	-66.23	-65.56
	1.215GHz以上	dBm	≤-30	-37.56	-39.00	-38.34
【受信】						
副次発射強度	30MHz～710MHz	dBm	≤-55	-97.82	-97.16	-98.89
	710MHz～900MHz	dBm	≤-55	-91.49	-91.61	-90.82
	900MHz～915MHz	dBm	≤-55	-98.87	-99.05	-97.98
	915MHz～930MHz	dBm	≤-54	-99.21	-99.38	-98.54
	930MHz～1GHz	dBm	≤-55	-97.95	-98.28	-98.45
	1GHz～5GHz	dBm	≤-47	-90.51	-90.28	-91.39
受信感度		dBm	—	-105.0	-96.0	※1
通信基地局切替判定閾値 (※2)		dBm	—	-85.0	-85.0	-85.0

(注) 赤字は規格内に入らない測定項目、黄色は注意が必要な項目である。

※1…4 値 GFSK の特性は未測定

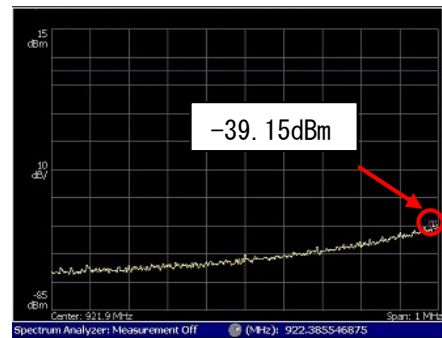
※2…通信基地局切替判定閾値：この閾値以上のビーコン信号を受信したら、基地局との通信を開始する。

3 種類の伝送速度での変調信号 (PN9) 波形とスプリアス波形を図 6.2.3-1 (a)～図 6.2.3-1 (c) に示す。4 値 GFSK-1Mbps 時のスプリアス発射強度が規格値を超えていることが分かる。



(a)-1 PN9 波形 (span=3MHz) -

(a) 伝送速度 : 100kbps、周波数偏移 : 50kHz、2 値 GFSK、単位チャネル ; 2



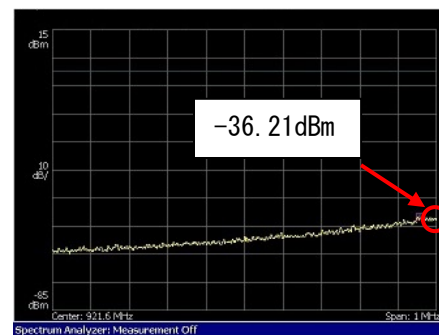
(a)-2 スプリアス波形

周波数範囲 : 921.4MHz~922.4MHz



(b)-1 PN9 波形 (span=3MHz)

(b) 伝送速度 : 500kbps、周波数偏移 : 125kHz、2 値 GFSK、単位チャネル ; 5



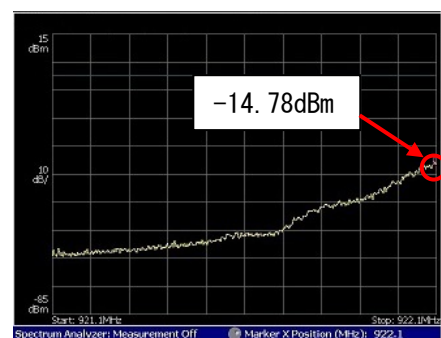
(b)-2 スプリアス波形

周波数範囲 : 921.1MHz~922.1MHz



(c)-1 PN9 波形 (span=3MHz)

(c) 伝送速度 : 1Mbps、周波数偏移 : 125kHz、4 値 GFSK、単位チャネル ; 5



(c)-2 スプリアス波形

周波数範囲 : 921.1MHz~922.1MHz

図 6.2.3-1 試作機の無線特性

6.2.4 基地局の特性

基地局の特性測定結果を表 6.2.4-1 に示す。基地局は、ダイバーシティアンテナの構成としたので、二つのアンテナの特性を測定した。基地局は、送信出力を 11dBm に下げること、915MHz~930MHz 帯域のスプリアス規格を満足した。

表 6.2.4 -1 基地局の無線特性

項目		単位	規格値	基地局 製品No. 2		基地局 製品No. 3	
				アンテナ端1	アンテナ端2	アンテナ端1	アンテナ端2
【送信】							
送信周波数		MHz	922.800089	922.800089		922.800274	
送信周波数偏差		ppm		0.10		0.30	
送信出力		20mW	dBm	11.33	11.30	11.18	11.10
占有周波数帯幅		kHz	≦1000	508.72	509.69	509.43	508.59
隣接CH漏洩電力		Hi	dB	≦-15	-28.52	-28.40	-28.20
				Lo	≦-15	-29.23	-29.34
ス プ リ ア ス 発 射 強 度	710MHz以下	dBm	≦-36	-62.95	-63.53	-62.23	-63.40
	710MHz～900MHz	dBm	≦-55	-63.42	-63.62	-62.44	-63.28
	900MHz～915MHz	dBm	≦-55	-68.12	-69.84	-68.23	-68.87
	915MHz～930MHz	dBm	≦-36	-37.55	-37.19	-37.33	-36.10
	930MHz～1GHz	dBm	≦-55	-64.57	-64.88	-65.02	-64.98
	1GHz～1.215GHz	dBm	≦-45	-66.84	-66.88	-67.05	-66.95
	1.215GHz以上	dBm	≦-30	-51.79	-51.72	-51.79	-52.50
【受信】							
副 次 発 射 強 度	30MHz～710MHz	dBm	≦-55	-98.43	-98.04	-99.13	-98.44
	710MHz～900MHz	dBm	≦-55	-91.53	-91.52	-91.07	-91.65
	900MHz～915MHz	dBm	≦-55	-98.33	-98.27	-98.67	-99.31
	915MHz～930MHz	dBm	≦-54	-99.10	-100.40	-98.99	-98.25
	930MHz～1GHz	dBm	≦-55	-97.72	-96.76	-98.64	-90.71
	1GHz～5GHz	dBm	≦-47	-90.64	-90.50	-90.75	-90.76
受信感度		dBm		-96.50	-96.50	-96.50	-96.50

6.3 電界強度

3m 法にて移動局、基地局の電界強度を確認した。 -

6.3.1 設置環境

電界強度測定時の設置環境及び使用計測器を図 6.3.1-1、表 6.3.1-1 に示す。無線機は 1.5m の高さに設定した。

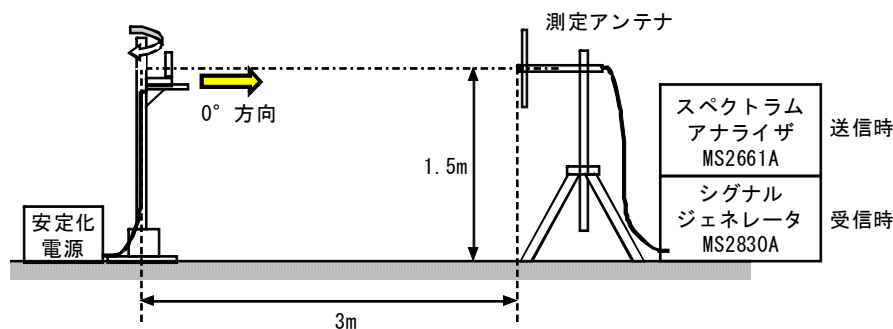


図 6.3.1-1 電界強度の測定方法

表 6.3.1-1 使用計測器

項目	品番	メーカー
スペクトラムアナライザ	MS2661A	Anritsu
シグナルジェネレータ	MS2830A	Anritsu
測定アンテナ	ダイポールアンテナ	Anritsu

6.3.2 基地局の送信電界強度の測定結果

基地局の送信電界強度の測定結果を表 6.3.2-1、図 6.3.2-1、図 6.3.2-2 に示す。アンテナ 1 (ANT1) とアンテナ 2 (ANT2) の測定値に 3dB 程度の差が確認されたが、その原因は AC アダプタのケーブルの影響によると考えているが、原因の特定には至っていない。

表 6.3.2-1 基地局送信電界強度

測定角度 [°]	送信電界強度 [dB μ V/m]	
	ANT1	ANT2
0	99.37	104.14
30	102.20	99.96
60	100.64	101.17
90	97.50	100.45
120	96.96	98.21
150	95.21	99.40
180	96.32	100.37
210	98.27	99.63
240	97.70	99.70
270	96.62	104.58
300	98.60	104.32
330	99.32	105.25
max	102.20	105.25
min	95.21	98.21
指向性 [dB]	6.99	7.04

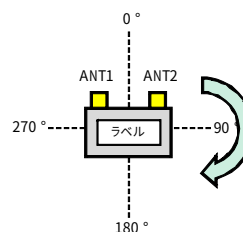


図 6.3.2-1 基地局回転方向

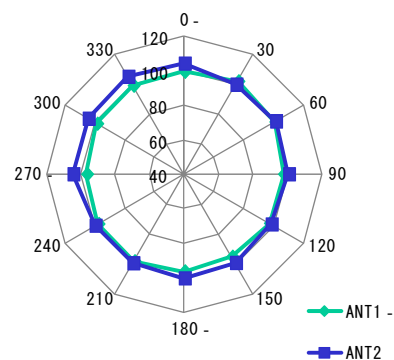


図 6.3.2-2 基地局送信電界強度グラフ

6.3.3 基地局の受信電界強度の測定結果

基地局の受信電界強度の測定結果を表 6.3.3-1 及び図 6.3.3-1、図 6.3.3-2 に示す。最初の測定では、LAN モジュールが動作すると、受信電界強度が悪化した（表 6.3.3-1 の LAN ノイズ対策前の項目の測定値参照）。LAN モジュール及び周辺回路をシールドケースで覆い、ノイズを遮断することとした。その結果、LAN モジュールが動作していない状態と同等の性能を得ることが出来た（表 6.3.3-1 LAN ノイズ対策後の項目の測定値参照）。

表 6.3.3-1 基地局の受信電界強度

測定 角度 [°]	受信電界強度[dBμV/m]					
	ANT1 LAN_ON			ANT2 LAN_ON		
	対策前	対策後	変化量	対策前	対策後	変化量
0	62.5	37.0	-25.5	46.5	38.5	-8.0
30	59.5	38.0	-21.5	50.5	38.5	-12.0
60	60.5	36.0	-24.5	47.5	41.0	-6.5
90	63.0	39.0	-24.0	48.5	39.5	-9.0
120	65.0	43.0	-22.0	50.5	39.0	-11.5
150	66.5	41.5	-25.0	49.0	41.0	-8.0
180	65.0	42.0	-23.0	49.5	41.0	-8.5
210	63.5	42.5	-21.0	49.0	40.5	-8.5
240	63.0	40.0	-23.0	49.0	40.5	-8.5
270	64.5	40.5	-24.0	45.5	35.5	-10.0
300	62.5	38.0	-24.5	45.0	35.5	-9.5
330	62.0	38.0	-24.0	44.5	35.5	-9.0
max	66.5	43.0	-23.5	50.5	41.0	-9.5
min	59.5	36.0	-23.5	44.5	35.5	-9.0
指向性 (dB)	7.0	7.0	0.0	6.0	5.5	-0.5

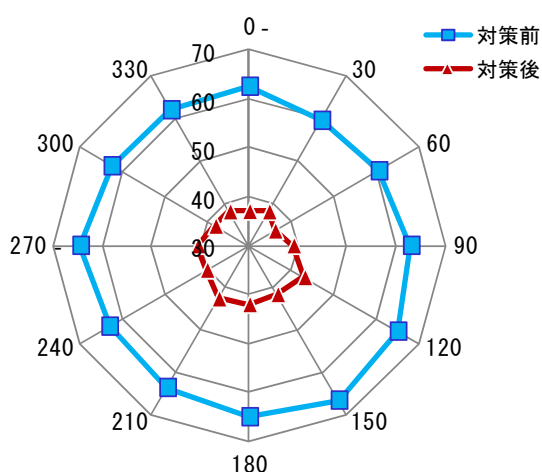


図 6.3.3-1 ANT1 受信電界強度グラフ

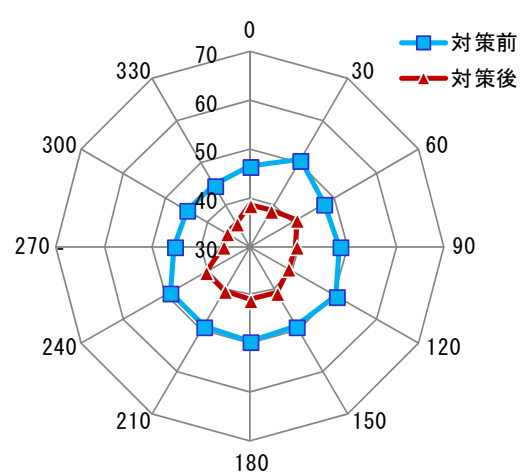


図 6.3.3-2 ANT2 受信電界強度グラフ

6.3.4 移動局の送信電界強度の測定結果

(1) 移動局の基本性能評価

移動局を高さ 1.5m のポール上に設置した状態で、移動局の送信電界強度の測定を行った。測定結果を表 6.3.4-1、図 6.3.4-1、図 6.3.4-2 に示す。基地局より 3~6dB 高い測定結果を得られた。

表 6.3.4-1 移動局送信電界強度

測定角度 [°]	送信電界強度[dB μ V/m]
	ポール取付
0	104.63
30	102.22
60	101.08
90	103.90
120	106.92
150	108.18
180	108.54
210	108.44
240	107.84
270	107.01
300	106.34
330	105.55
max	108.54
min	101.08
指向性 (dB)	7.46

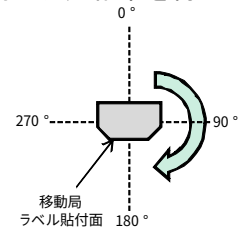


図 6.3.4-1 移動局回転方向

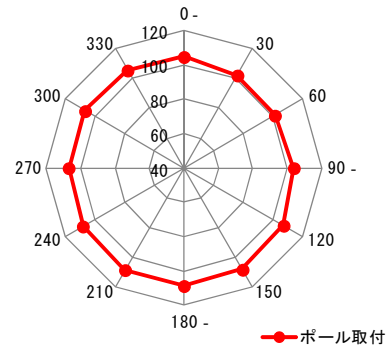


図 6.3.4-2 移動局送信電界強度グラフ

(2) 移動局を腕に付けた場合の評価

人に取り付けた状態での移動局の送信電界強度の測定結果を表 6.3.4-2、図 6.3.4-3、図 6.3.4-4 に示す。人に取り付けた状態では、特に移動局と測定機器の間に人体がある方向（配置）の場合、1.5m のポール上で測定した場合より 24.8dB 劣化した。人体等の影になった場合には、25dB 程度のマージンが必要であることが分かった。

表 6.3.4-2 腕に付けた移動局の送信電界強度

測定角度 [°]	送信電界強度[dB μ V/m]		変化量 [dB]
	ポール取付	左腕取付	
0	104.63	105.57	0.94
30	102.22		
60	101.08		
90	103.90	97.04	-6.86
120	106.92		
150	108.18		
180	108.54	83.70	-24.84
210	108.44		
240	107.84		
270	107.01	96.97	-10.04
300	106.34		
330	105.55		
max	108.54	105.57	—
min	101.08	83.70	—
指向性 (dB)	7.46	21.87	—

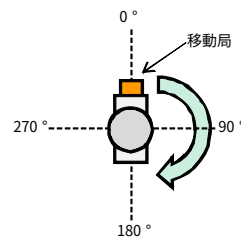


図 6.3.4-3 左腕取付け回転方向

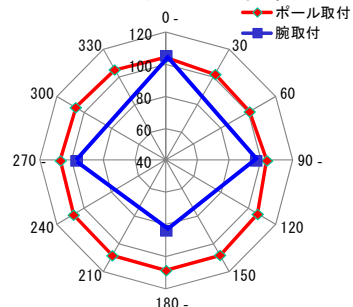


図 6.3.4-4 送信電界強度

6.3.5 移動局の受信電界強度の測定結果

高さ 1.5m のポール上に設置した状態での移動局の受信電界強度を測定した。測定結果を表 6.3.5-1 及び図 6.3.5-1 に示す。GPS モジュールのノイズによる影響を評価したが、GPS モジュールからのノイズの影響は確認されなかった。本実験では、通信基地局切替判定閾値 (-85dBm) の制御を組み込んだ移動局で行った。このため、-85dBm 以下の受信信号を捨てているため、基地局に比べて、約 13dB 悪い値を示した。

表 6.3.5-1 移動局の受信電界強度

測定角度 [°]	受信電界強度[dBμV/m]		変化量 [dB]
	GPS OFF	GPS ON	
0	51.02	50.52	-0.50
30	54.02	53.52	-0.50
60	55.02	54.52	-0.50
90	52.52	52.52	0.00
120	49.02	49.52	0.50
150	48.52	48.02	-0.50
180	48.02	48.02	0.00
210	47.52	48.02	0.50
240	48.52	48.52	0.00
270	49.02	49.52	0.50
300	50.52	50.02	-0.50
330	50.02	51.02	1.00
max	55.02	54.52	—
min	47.52	48.02	—
指向性 [dB]	7.50	6.50	—

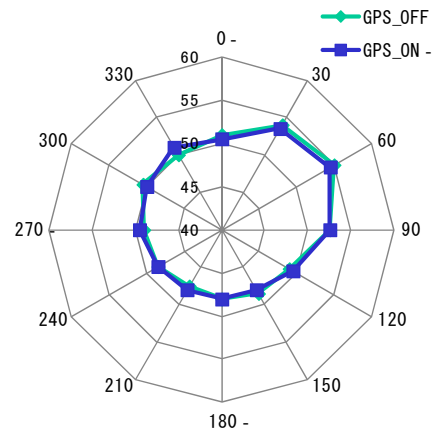


図 6.3.5-1 受信電界強度グラフ

6.3.6 移動局の受信電界強度の測定結果

移動局を人に取り付けた状態での受信電界強度の測定結果を行った。測定結果を表 6.3.6-1 及び図 6.3.6-1、図 6.3.6-2 に示す。人の向きによって 1.5m ポール上での結果から最大 26.5dB 劣化しており、送信電界強度と同様の結果が確認された。本測定では、GPS モジュールはオン状態で行った。

表 6.3.6-1 腕に付けた場合の移動局の受信電界強度

測定角度 [°]	受信電界強度[dBμV/m]		変化量 [dB]
	ポール取付	左腕取付	
0	50.52	51.02	1.0
30	53.52		
60	54.52		
90	52.52	56.52	4.0
120	49.52		
150	48.02		
180	48.02	74.52	26.5
210	48.02		
240	48.52		
270	49.52	63.02	13.5
300	50.02		
330	51.02		
max	54.52	59.52	—
min	48.02	36.02	—
指向性 [dB]	6.50	23.50	—

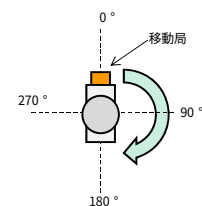


図 6.3.6-1 左腕取付け回転方向

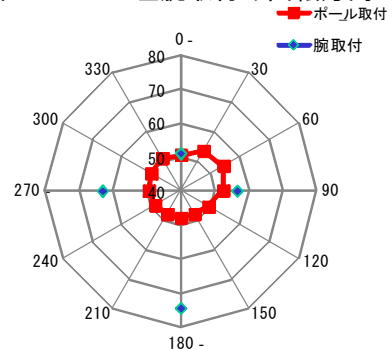


図 6.3.6-2 受信電界強度グラフ

6.4 PER の評価

PER(Packet Error Rate) を以下に示す実験方法で評価した。

6.4.1 PER の実験方法

PER の実験システムの構成を図 6.4.1-1 に示す。移動局と基地局を同軸ケーブルで有線接続し、アッテネータで受信レベルを変更して通信試験を行った。

PER の試験は下記の条件で行った。

- ・ 伝送速度：500kbps
- ・ 送信パケットは実証試験で用いるパケットとする。
基地局からは、ビーコン信号のパケット（74byte）を送信する。
移動局からは、センサ情報のパケット（155byte）を送信する。
- ・ 受信信号レベルは、-76.5dBm とする。

移動局は、通信基地局切替判定閾値（-85dBm）以下のビーコン信号は捨てて、この閾値以上のビーコン信号のみ受信するようにしてある。受信信号レベルがこの閾値より低くならないように、-76.5dBm に設定して実験を行った。

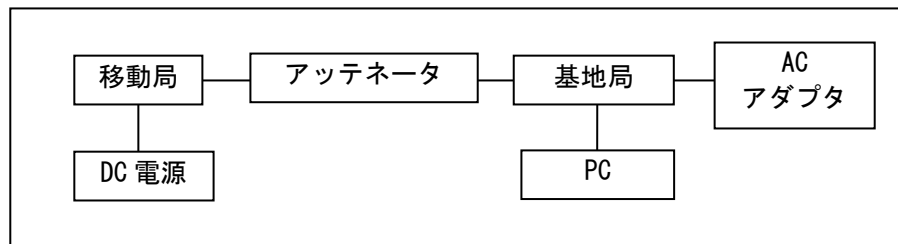


図 6.4.1-1 PER の実験システムの構成

6.4.2 実験結果

PER の測定結果を表 6.4.2-1 に示す。受信信号の信号レベル（無線基板の入力端子の受信信号レベル）が-76.5dBm の場合、PER は 0.4%であった。

表 6.4.2-1 PER の測定結果

機器出力設定	アッテネータ [dB]	通信 回数 [回]	成功 回数 [回]	失敗 回数 [回]	通信成 功率 [%]	エラー レート [%]	基板端 受信信号 レベル [dBm]
移動局：12dBm 基地局：11dBm	0	49201	49199	2	99.996	0.0041	10
移動局：-6dBm 基地局：-7dBm	50	46244	46243	1	99.998	0.0022	-58.0
移動局：-6dBm 基地局：-7dBm	67	33571	33441	130	99.613	0.3887	-76.5

※基板端受信信号レベル＝移動局が受けた基地局からのビーコンレベル

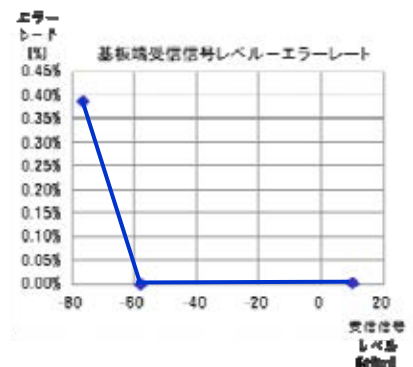


図 6.4.2-1 PER の測定結果

6.5 無線通信距離の評価

無線通信距離の実測は、郊外の遮蔽物がなく、見通しの良い環境で、基地局と移動局間及び 2 台の移動局間の通信距離を評価した。

6.5.1 通信距離の評価方法

以下の 3 通りの評価方法にて無線通信距離の測定を行った。

(a) 移動局と基地局間の通信距離の評価

基地局と移動局を高さ 1.5m のポール上に設置して、移動局と基地局間の通信距離を評価した。

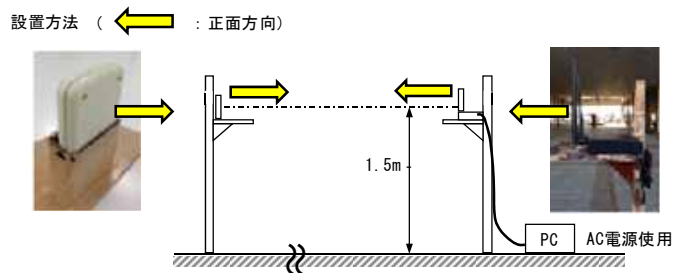


図 6.5.1. (a) 移動局と基地局間の通信距離の評価方法

(b) 移動局を腕に取付けた状態での通信距離の評価

移動局を人の腕に取り付けて、基地局との通信距離を評価した。

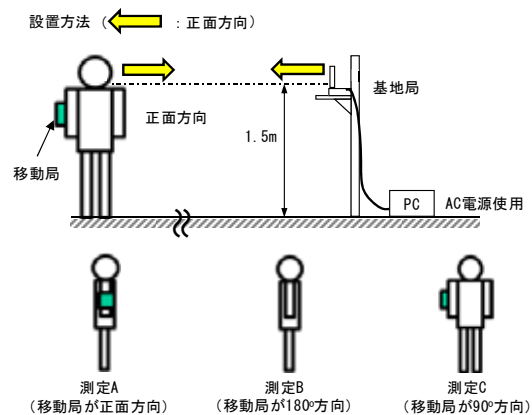


図 6.5.1. (b) 移動局を腕に付けた場合の通信距離の評価方法

(c) 移動局間の通信距離の評価

移動局を高さ 1.5m のポール上に設置して、2 台の移動局間の通信距離を評価した。

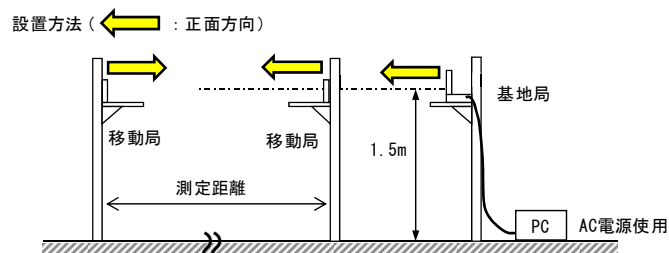


図 6.5.1. (c) 移動局間の通信距離の評価方法

6.5.2 通信距離の測定結果

通信距離の測定結果を表 6.5.2-1、図 6.5.2-1 に示す。移動局と基地局を 1.5m ポール上に設置した場合の通信距離（移動局-基地局間 1）は、約 280m、移動局を腕に取り付けた状態（移動局-基地局間 2）では、移動局と基地局間に人が入る最悪条件（移動局-人体取り付け 180°）の場合の通信距離は、約 80m であった。

移動局間の通信距離は、400m であった。移動局と基地局間の通信距離よりも、約 100m 通信距離が伸びている。この差は移動局と基地局の送信電界強度の差（約 3～6dB）によるものと想定されるが、それ以外の原因の可能性もある。

表 6.5.2-1 通信距離の測定結果

通信距離 [m]	移動局－ 基地局間1[%]	移動局－基地局間2[%]			移動局－ 移動局 [%]
	移動局－ ポール取付	移動局－人体 取付正面	移動局－人体 取付180°	移動局－人体 取付90°	
40	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100
80	100	100	91	100	100
100	100	100	27	100	100
120	100	98	15	100	100
140	100	100	0	100	100
160	100	96	0	91	100
180	100	98	0	0	100
200	100	96	0	91	100
220	100	98	0	91	100
240	100	83	0	0	100
260	100	91	0	40	100
280	95	84	0	0	100
300	0	6	0	0	100
320	0	0	0	0	100
360	0	0	0	0	100
380	0	0	0	0	100
400	0	0	0	0	98
420	0	0	0	0	15
440	0	0	0	0	0
460	0	0	0	0	0

： 90%以下の箇所

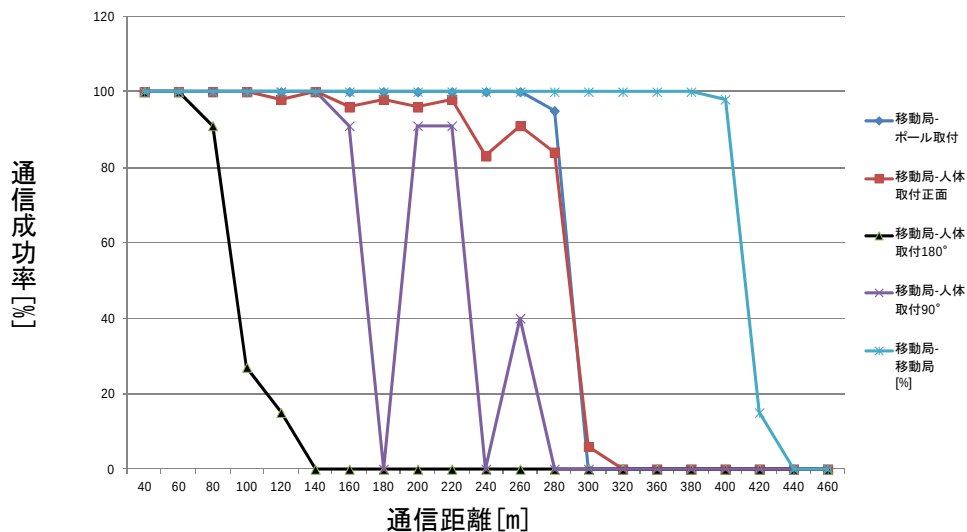


図 6.5.2-1 通信距離の測定結果

今回の試験は、地上 1.5m で行ったが、マラソンなどでは障害物の影響を考慮して、ビルの屋上などに基地局を設置する場合も多いと思われる（実際に今回の試験では屋上に基地局を設置した）。送受信機の高低差により、電界強度が変わるため、通信速度やエラーレートに影響が発生する可能性が考えられる。本評価に関しては今後の課題である。

6.5.3 通信距離の理論値の評価

基地局と移動局の電界強度測定結果より、自由空間損失と大地反射波による損失の理論式を用いて、基地局－移動局間の通信距離を算出した。

①基地局と移動局を地上高さ 1.5m のポールに配置した場合

- ・ 基地局送信電界強度 : 98.21dB μ V/m ※アンテナ 2 最悪値
- ・ 移動局受信電界強度 : 54.52dB μ V/m
- ・ 上記数値から算出した通信距離想定値 : 275m

②基地局を地上高さ 1.5m のポールに配置し、移動局を腕に付けた場合（人の影になる最悪条件）

- ・ 基地局送信電界強度 : 92.21dB μ V/m ※アンテナ 2 最悪値
- ・ 移動局受信電界強度 : 74.52dB μ V/m ※最悪方向
- ・ 上記数値から算出した通信距離想定値 : 85m

使用した理論式は以下の通りである。

自由空間損失 $LOS[dB]=20 \times \log(4\pi r/\lambda)$

大地反射波による損失 $REF[dB]=20 \times \log(\text{abs}(2 \times \sin(2\pi \times h1 \times h2 / (r\lambda))))$

ここで、 r : 距離[m]、 λ : 波長[m]、 $h1$ 、 $h2$: 無線機高さ

基地局と移動局を地上高さ 1.5m のポール上に設置した場合の通信距離は、275m となった。また、腕に付けた場合の最悪条件での通信距離は、85m となった。これは実測値とほぼ同じ通信距離である。

なお、奥村-秦モデルも検討したが、通信距離の想定値が約 30m となった。本モデルは、「伝播距離：1～20km」、「基地局アンテナ高：30～200m」を想定しているため、今回の試験環境とは一致しないかもしれない。

6.6 スループット

移動局と基地局の無線通信のスループットを評価した。

6.6.1 スループットの試験方法

図 6.6.1-1 にスループットの試験方法を示す。無反射セル内に基地局と移動局を約 50cm 離れた状態で設置し、基地局から 1 秒周期でビーコン信号を送信して、無線通信のスループットを確認する。移動局は 1 台で、50 台分のセンサ情報（50 スロット全てでセンサ情報を伝送する）を送信するように設

定した。1 秒毎に無線通信を行う。基地局と PC を LAN ケーブルにて接続し、PC のログデータから通信品質を評価した。

試験の設定条件は以下の通りである。

伝送速度：500kbps

マルチホップ構成：シングルホップのみ（基地局と移動局間の通信）

基地局から送信するビーコン周期：1 秒周期

基地局から送信するビーコン信号：74byte

移動局から送信するセンサ情報：1 スロット分は 155byte

脈派センサのデータ：ダミーデータ（受信信号レベル）のデータを使用

計測時間：1 時間

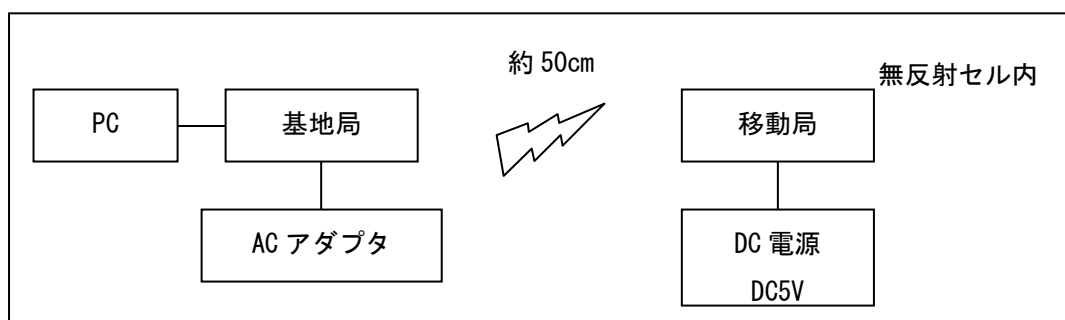


図 6.6.1-1 スループットの評価方法

6.6.2 スループットの試験結果

試験結果を表 6.6.2-1 に示す。センサ情報のパケット数 180,000 を全て受信できた。本移動局と基地局を制御するファームウェアが、実証試験でも問題なく動作することが確認できた。

表 6.6.2-1 試験結果

項目	パケット数
基地局が受信したセンサ情報のパケット数	180,000
欠損パケット数	0

6.7 伝送遅延時間の評価

基地局から送信するビーコン信号、移動局から送信するセンサ情報をスペクトラムアナライザのタイムドメインモードを用いて、パケットの送信タイミングを実測した。この値と設計値との差を出し、TDMA でのパケット送信タイミングの時間マージンを伝送遅延時間として評価した。

6.7.1 使用計測器

パケットの送信タイミングの測定に使用した計測器を表 6.7.1-1 に示す。

表 6.7.1-1 使用計測機器

項目	品番	メーカー
スペクトラムアナライザ	RSA3303A	Tektronix

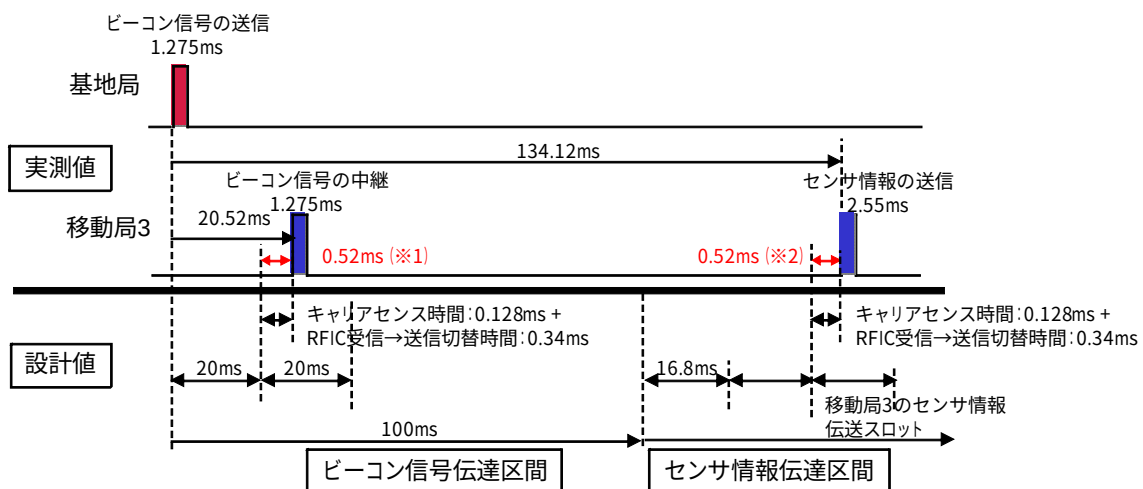
6.7.2 実測結果

(1) ビーコン信号の中継時間とセンサ情報の送信時間の評価

ビーコン信号の中継時間とセンサ情報の送信時間の実測値と設計値と比較した結果を図 6.7.2-1 に示す。設計値と実測値を比較するために、信号衝突防止用のランダム時間 (0ms~6.0ms) は、0ms に固定して評価した。

移動局が基地局からのビーコン信号を受信してからビーコン信号を送信 (中継) するまでに必要な時間 (遅延時間) は、キャリアセンス時間と、RF-IC の受信から送信への切替時間である。設計値は、0.468ms で、実測値は、0.52ms であった。設計値と実測値の誤差は、0.052ms であった。

また、移動局がセンサ情報を送信するために必要な時間 (遅延時間) も同様に、設計値は、0.468ms で、実測値は、0.52ms であった。設計値と実測値の誤差は、0.052ms であった。



※1: ビーコン信号の中継スロット開始から移動局3がビーコン中継送信を開始するまでの時間

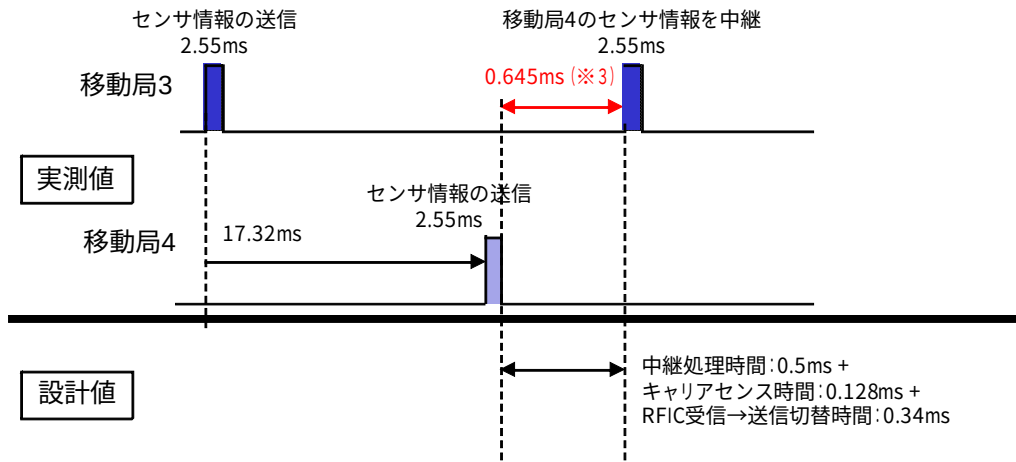
※2: 移動局3のセンサ情報伝送スロット開始からセンサ情報の送信を開始するまでの時間

図 6.7.2-1 ビーコン信号の中継とセンサ情報の送信の遅延時間の評価

(2) センサ情報の中継時間の評価

センサ情報を中継する場合の処理時間 (遅延時間) の設計値と実測値を比較した結果を図 6.7.2-2 に示す。移動局がセンサ情報を中継する時に生じる伝送遅延時間は、センサ情報の中継処理時間、キャリアセンス時間、RF-IC の受信から送信への切替時間である。設計値は、0.968ms で、実測値は、0.645ms であった。設計値と実測値の誤差は、0.323ms であった。設計値より、短い時間でセンサ情報の中継処

理を実現できている。



※3:移動局4のセンサ情報送信終了から、移動局3がセンサ情報の中継送信を開始するまでの時間

図 6. 7. 2-2 センサ情報中継時の遅延時間

本試作機でのパケット送信、パケット中継に必要な処理時間（遅延時間）の設計値と実測値の比較結果を表 6. 7. 2-1 にまとめた。

表 6. 7. 2-1 送信時の遅延時間比較

項目	設計値 [ms]	実測値 [ms]	設計値との差 [ms]
ビーコン信号の送信時間	1.184	1.275	0.091
ビーコン中継時の遅延時間	0.468	0.52	0.052
ビーコン信号の中継送信時間	1.184	1.275	0.091
センサ情報送信時の遅延時間	0.468	0.52	0.052
センサ情報の送信時間	2.48	2.55	0.07
センサ情報中継時の遅延時間	0.968	0.645	-0.323
センサ情報の中継送信時間	2.48	2.55	0.07

6. 7. 3 システムへの影響検証

(1) ビーコン信号中継時の伝送遅延時間

キャリアセンス区間が最長の 15ms（ランダム待ち時間が最長のケース）となった場合に遅延時間が最も長くなる。この場合、キャリアセンス区間 15ms + ビーコン中継時の遅延時間の実測値 0.52ms + ビーコン信号の中継送信時間の実測値 1.275ms の合計が 16.795ms となる。ビーコン信号を中継するためのスロット時間 20ms に対して処理時間に余裕がある。

(2) センサ情報送信時とセンサ情報中継時の伝送遅延時間

センサ情報の処理時間で最も厳しいのは、センサ情報を 5 ホップした場合である。この場合に必要な処理時間は、センサ情報の送信または中継時間の実測値 2.55ms × 5 ホップ分 + センサ情報中継時の遅延時間の実測値 0.645ms × 4 回の合計時間の 15.33ms となる。センサ情報を伝送するためのスロット時間 16.8ms に対して処理時間に余裕がある。

6.8 干渉実験の評価

920MHz帯の周波数（ARIB STD-T108）を利用している機器は、キャリアセンス機能が実装されている。本試作機もキャリアセンス機能を実装している。よって、同一周波数を使用するアクティブ系小電力無線システムの機器に対しては、直接的な混信の可能性は少ないと思われる。また、本システムの移動局は、移動して使用されることが前提であり、長時間に渡り、相手機器の通信品質に影響を与える可能性も少ないと想定される。実機での干渉実験を行い、相手機器に影響を与えるかどうかを評価する。

本干渉試験では、本試験機は、スループット試験と同じシステム構成とし、移動局 1 台に、50 台分のセンサ情報を送信させるようにする。この状態で、他の 920MHz 帯を利用している機器を近くに設置し、両方の機器の通信品質を評価した。

(1) 干渉実験に使用した 920MHz 帯システムの概要

既存の 920MHz 帯を利用したシステムとして、セイコーインスツル株式会社製の無線センサネットワーク（以下既存システム 1 と呼ぶ）を用いて干渉実験を行った。既存システム 1 の仕様を表 6.8-1 に示す。また、既存システム 1 の通信方式を図 6.8-1 に示す。既存システム 1 は、スター型のネットワーク構成で動作させた。既存システム 1 は、データ送信とその ACK を受信するという簡単な通信方式を採用している。センサノードが、基地局に対して 1 分毎にセンサ情報を送信すると、センサ情報を受信した基地局は、センサノードに対して ACK を送信する方式である。図 6.8-2 に既存システム 1 の送信波形と送信タイミングを示す。センサ情報の送信時間は 3.26ms、ACK の送信時間は 3.15ms であった。

表 6.8-1 既存システム 1 の概略仕様

項目	仕様
製品番号	センサノード : SW-4210 基地局 : SW-4300
送信電力	20mW
無線周波数	920.8MHz～922.0MHz 922.6MHz～927.8MHz

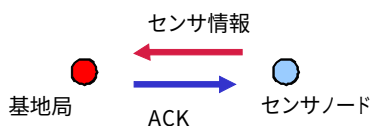


図 6.8-1 既存システム 1 の通信方式

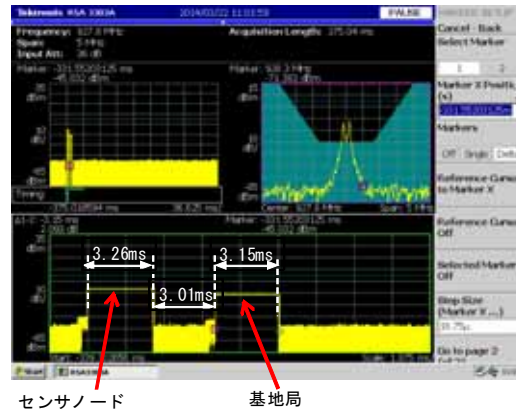


図 6.8-2 既存システム 1 の送信波形と送信タイミング

(2) 干渉実験の試験方法

図 6.8-3 に示すように、既存システム 1 と本試作機を同時に動作させ、各システムの通信成功率を評価する。ここで、本試作機の移動局は 1 台で 50 台分のセンサ情報を送信するように設定し、実際に 50 台が接続された時のパケット数が送信されるようにした。

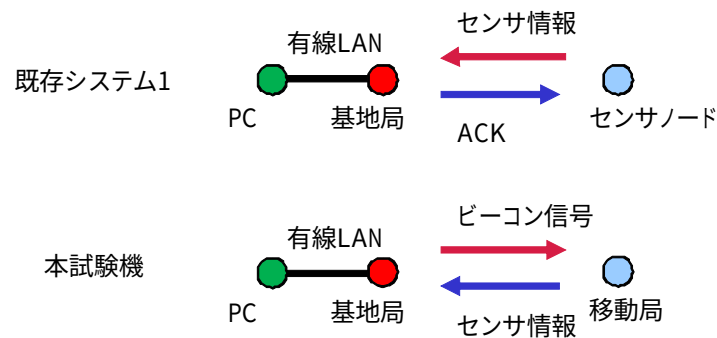


図 6.8-3 干渉実験時のシステム図

(3) 干渉実験の試験結果

干渉実験の試験結果を表 6.8-2 に示す。既存システム 1 では、通信成功率が 100% (通信成功回数 60 回/通信回数 60 回) であり、本システムからの影響はないといえる。既存システム 1 は、データ送信が成功するまで、キャリアセンスと送信を繰り返している。

本試験機の通信成功率は、93% (通信成功回数 560 回/通信回数 600 回) であった。図 6.8-4 に本試験機の移動局の送信タイミングを示す。図に示すように、他システムのキャリアを検知した場合には、センサ情報の送信をしていない。本試作機では、キャリアセンスで他のシステムが送信中であることを検知した場合、移動局は、そのタイミングでのセンサ情報の送信をあきらめる方式を採用したためである。本試作機では、送信できなかったセンサ情報に関しては、次のセンサ情報を送信するタイミングで、再送制御を行っている。この再送制御でセンサ情報の救済が行えるため、本試作機への影響もないと考える。

表 6.8-2 干渉実験結果

既存システム 1 の通信成功率[%] (通信回数 : 60 回)	本試作機の通信成功率[%] (通信回数 : 600 回)
100%	93%



図 6.8-4 本試験機の移動局の送信タイミング

6.9 まとめ

基礎技術試験を実施することにより、本試作機が要求仕様を満たし、マラソン大会での実証試験に使用可能であることを評価した。評価結果は以下の通りである。

(1) 無線基礎特性

所望の無線特性を実現していることを確認した。但し近傍スプリアス発射強度において、電波法規格値に対して余裕がなく、使用可能周波数も限定された。今回の技術試験の検討対象になっていないが、500Kbps 以上の伝送速度を実現するためには、近傍スプリアス発射強度の規格値の検討も必要と考える。

(2) 電界強度と通信距離

データ伝送速度 500kbps において、基地局と移動局の通信距離は、見通しで約 300m であることを確認した。移動局を腕に付けて基地局の位置が人の影になった場合に、約 25dB 性能が劣化することを確認した。この場合の通信距離は約 80m となる。この性能劣化を回避するのに、迂回ルートを利用できるマルチホップ通信が有効であることを応用試験で評価する。

(3) PER

基地局と移動局間でのパケット通信試験で、受信信号の入力レベルが -76.5dBm 以上で、PER が 0.4% 以下であることを確認した。

(4) スループット

1 台の移動局から 50 台分のセンサ情報を送信し、基地局との無線通信を評価した。連続 1 時間で 180,000 パケット (50 台分 $\times$ 3,600 秒) のセンサ情報の送信を行い、基地局でのパケットの欠損は 0 であった。

(5) 伝送遅延時間

本試験機で採用したフレームフォーマットにおけるパケットの送信タイミングの設計値と実測値を比較し、実証試験に問題ないことを確認した。

(6) 干渉試験

本試験機と既存の 920MHz 帯を利用した機器との干渉実験を行い、お互いに通信に影響無いことを確認した。

なお、マラソンタイム自動計測器との通信干渉試験と、センサ情報の取得結果に関しては、第 7 章の応用試験で報告する。

[参考文献]

[6-1]TELEC-T245 テレメーター用、テレコントロール用及びデータ伝送用特定小電力無線局に使用するための無線設備 (920MHz 帯) (テレメーター用、テレコントロール用及びデータ伝送用特定小電力機器 (920MHz 帯)) の特性試験方法 (発行: 一般財団法人 テレコムエンジニアリングセンター)

第7章 応用試験

7.1 マラソンを想定したマルチホップ事前試験

立山科学工業の南工場周辺にてマルチホップの事前試験を行った。 -

7.1.1 マルチホップ試験方法

下記のマルチホップ事前試験を行った。

(1) 基地局のエリア切替の確認

基地局を2台設置し、移動局のローミング試験を行う。2台の基地局は、別の周波数でビーコン信号を送信させる。移動局は、基地局からのビーコン信号を検索し、各基地局の通信エリアに入った時に、基地局との通信ができるかどうかを確認する。基地局1をスタート地点に設置し、基地局2をゴール地点に設置し、高さ1.5mのポール上に固定する。移動局を左腕に付け南工場の周囲を走行する。

(2) マルチホップの動作確認

南工場周辺の比較的狭い空間で5ホップの動作を確認するために、基地局、移動局の送信出力を以下の様に変更する。

基地局：11dBm ⇒ -6dBm

移動局：12dBm ⇒ 6dBm

基地局を南工場正面玄関前に設置し、4人が移動局を両腕に、2人が移動局を左腕に付け、南工場周囲をジョギング程度のスピード（約6～8km/h）で走行する。

7.1.2 マルチホップ試験結果

(1) 基地局エリア切替の試験結果

基地局エリア切り替えの試験結果を図7.1.2-1、表7.1.2-1に示す。移動局が各基地局付近に近付くと、通信する基地局が切り替わって、ルート情報が更新された。

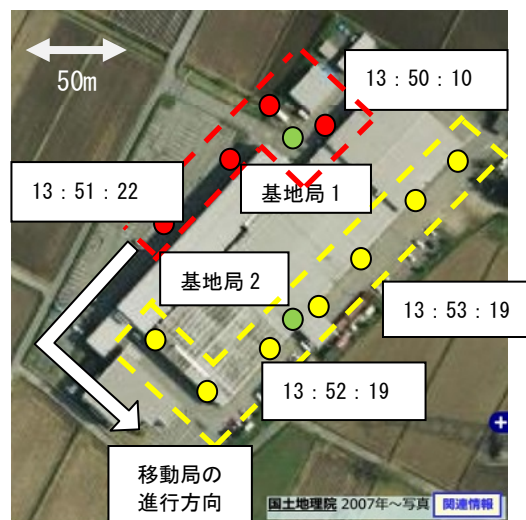


図 7.1.2-1 基地局エリア切替の試験方法

表 7.1.2-1 基地局エリア切替の試験結果

基地局1スタート時（赤色点線の範囲）に取得した移動局ルート情報

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
03	13:50:13	03>基1	36.63512	137.2632
03	13:50:32	03>基1	36.63522	137.2630
03	13:50:52	03>基1	36.63506	137.2628
03	13:51:22	03>基1	36.63481	137.2625

基地局2通過時（黄色点線の範囲）に取得した移動局ルート情報

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
03	13:51:39	03>基2	36.63437	137.2625
03	13:51:59	03>基2	36.63420	137.2627
03	13:52:19	03>基2	36.63443	137.2630
03	13:52:39	03>基2	36.63459	137.2632
03	13:52:59	03>基2	36.63478	137.2634
03	13:53:19	03>基2	36.63497	137.2636
03	13:53:35	03>基2	36.63511	137.2638

(2) マルチホップの試験結果

ホップ動作確認結果を図 7.1.2-2、図 7.1.2-3、表 7.1.2-2 に示す。走行中の移動局 10 台全てからログデータを取得でき、5 ホップ動作を行っていることを確認した。この結果より、実証実験でも正常なマルチホップ動作を行う事が可能と判断した。

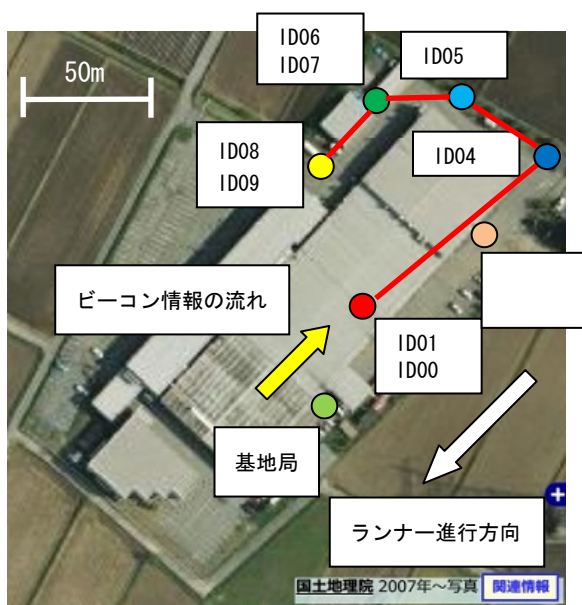


図 7.1.2-2 マルチホップの試験方法

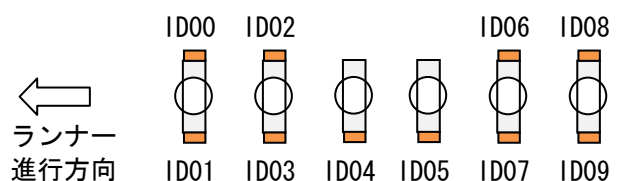


図 7.1.2-3 実験時のランナーの並び

表 7.1.2-2 5 ホップの試験結果

移動局ルート情報

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
00	14:24:24	00>01>基	36.63472667	137.2633408
01	14:24:24	01>基	36.63483733	137.2633402
02	14:24:24	02>01>基	36.63497967	137.2636907
03	14:24:24	03>01>基	36.63507517	137.2636937
04	14:24:24	04>01>基	36.63522883	137.2639415
05	14:24:24	05>04>01>基	36.63539817	137.2636445
06	14:24:24	06>05>04>01>基	36.63540467	137.2632655
07	14:24:24	07>05>04>01>基	36.635356	137.2633445
08	14:24:24	08>06>05>04>01>基	36.63524617	137.2630557
09	14:24:24	09>06>05>04>01>基	36.63529883	137.263167

※5ホップ時のビーコンのルート（基>01>04>05>06>08）

7.1.3 通信干渉試験の方法

図 7.1.3-1 は、マラソンのタイム計測システムとの通信干渉試験の写真である。タイム計測システムのタグは、靴紐に取り付けるタイプであった。このタグの ID をタイム計測システムのマットに実装されたタグリーダーで読み取るものである。タイム計測用機器は、IPICO 社の製品で、タグを起動する周波数は 125kHz、タグが ID 情報を送信する周波数は 6.8MHz である。

実験者は、タイム計測用タグを足に取り付け、本技術試験の移動局を腕に付けて、基地局と移動局を無線通信させた状態で、タイム計測用マットを横断し、双方の無線通信品質を確認した。

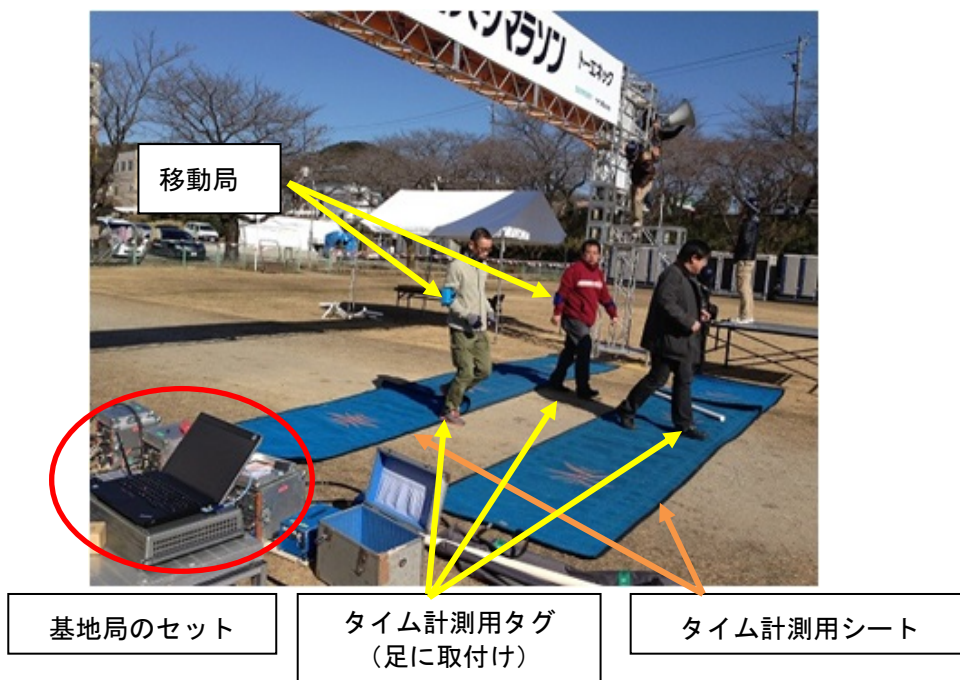


図 7.1.3-1 通信干渉試験の状況

7.1.4 通信干渉試験の結果

マラソンのタイム計測システム側では、上記の実験時にタグの ID の取りこぼしが無いことを確認した。本技術試験の基地局と移動局の通信成功率を表 7.1.4-1 に示す。移動局は 5 台使用した。基地局と移動局の通信成功率は、99%以上であり、マラソンのタイム計測システムが本システムに影響を与えないことを確認できた。この結果、本技術試験の無線機を犬山マラソンで利用することの承認を得ることができた。

表 7.1.4-1 基地局と移動局間の通信成功率

機器No	通信成功率[%] (通信：592回中の確率)
No. 03	100.00
No. 04	99.83
No. 05	99.66
No. 06	99.66
No. 07	99.83

7.2 実証試験

犬山市内で行われた犬山ハーフマラソン大会^[7-1]において、本技術試験の無線機を評価した。マラソン大会の概要は以下の通りである。本大会は、ハーフマラソンと 10km マラソンが行われ、両方で約 1 万名ランナーが参加した。本実証試験は、10km マラソンのコースで行われた。本実証試験のために、7 名のランナーに移動局とセンサを装着してもらい実際にマラソンに参加してもらった。

＜マラソン大会概要＞

- ・大会名 : 第 36 回 読売犬山ハーフマラソン
- ・主催 : 一般財団法人愛知陸上競技協会、読売新聞社、犬山市
- ・開催日 : 2014 年 2 月 23 日(日)
- ・実験競技 : 10km マラソン (競技時間 9:45~10:50)
- ・10km マラソン参加人数 : 約 1750 名

7.2.1 犬山マラソンでの試験内容と試験方法

犬山マラソンの 10km コース内に基地局を 2 台、中継局を 3 台(1 台は時間によって移動させる)配置した。移動局は 7 台用意した。2 台の移動局には脈波センサを接続し、残り 5 台には外付けセンサを取り付けず、センサデータの代わりに受信信号レベル(RSSI)を出力することとした。移動局は、実際にコースを走るランナーに取り付けて試験を行った。基地局で収集したセンサ情報は、携帯電話網を利用し、クラウドストレージで情報を共有して、本部で移動局の位置や脈波センサの情報をリアルタイムでモニタリングできるようにした。

基地局と中継局の設置位置を図 7.2.1-1 に示す。基地局 1 は、小林ビルの屋上に設置し、市街地での通信実験ができるようにした。ランナーが集合する運動場、スタート地点、スタートから犬山駅西交差点の周辺までカバーできるようにした。また、2 台の中継局 1、2 を基地局 1 と通信できる範囲に設置し、基地局 1 のカバーする範囲を広げている。なお、中継局は、移動局と同じ無線機である。基地

局 2 は、木曽川沿いの公園に設置し、建物などの障害物の無い平坦なエリアでの通信実験をできるようにした。基地局 2 の通信範囲を広げるために、中継局 3 を基地局 2 と通信できる範囲に設置した。

基地局と中継局の設置状態を図 7.2.1-2 と図 7.2.1-3 に示す。ランナーや他の障害物の影響がないように、基地局は高さ 3.5m のポール先端に取り付けた。中継局は、高さ 2m のポール先端に取り付けた。

移動局をランナーに取り付けた例を図 7.2.1-4 に示す。脈波センサを腕に取り付け、移動局は、ポーチに入れて、腕に取り付けた。



図 7.2.1-1 マラソンコース内の機器の設置位置



基地局 1 を設置した小林ビル



基地局 1 の設置状態



基地局 2 の設置状態

図 7. 2. 1-2 基地局の設置状態



中継局 2 (移動前) の設置状態



中継局 2 (移動後) の設置状態



中継局 3 の設置状態

図 7. 2. 1-3 中継局設置状態

移動局：
アームポーチに入れて
右の二の腕に取り付ける

脈波センサ：
右手首に取り付ける



図 7.2.1-4 移動局取り付け状態

図 7.2.1-5 にセンサ情報を本部の PC とデータ共有するためのシステム構成を示す。データ共有には、クラウドストレージ (Dropbox) を利用した。基地局は、中継局および移動局から送信されたセンサデータを受信し、制御用 PC から携帯電話網を使って、センサ情報をクラウドストレージにアップする。本部にモニター用の PC を設置し、モニタリング用ソフトウェアが、クラウドストレージのセンサ情報をリアルタイムで読み出し、ランナーの位置やセンサ情報をリアルタイムで表示する。

図 7.2.1-6 に本部に設置したモニター用 PC の画面を示す。画面上のマップにランナーの位置を表示し、右側のグラフには、脈波データを表示し、その変化をリアルタイムで確認できる画面になっている。

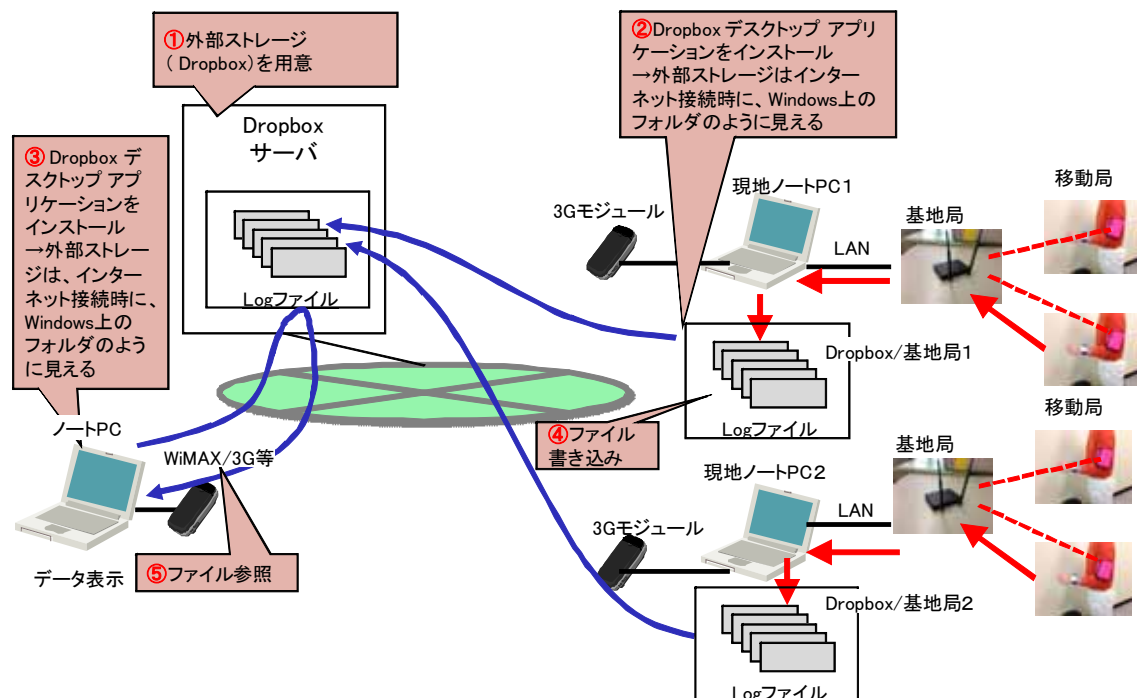


図 7.2.1-5 システム構成図



図 7.2.1-6 測定データ表示システムの画面

また、本実証試験では、取得したデータ（以下、ログデータと呼ぶ）から、下記 4 つの項目を評価する

- (1) 基地局と移動局間のマルチホップ通信の評価
- (2) 基地局と移動局間のデータ欠損率の評価
- (3) 受信信号レベル（RSSI）と通信距離の評価
- (4) センサ情報（脈波データ）の取得結果の評価

7.2.2 マルチホップ通信

基地局 1 で収集した各移動局のログデータからマルチホップのルートの更新状態の評価をした。

(1) 基地局 1 と移動局間のマルチホップの評価

図 7.2.2-1、図 7.2.2-2、図 7.2.2-3、図 7.2.2-4 に、スタート直後(9:46:01)、2 分後(9:48:01)、3 分後(9:49:01)、6 分後(9:52:01)の各移動局の位置情報と、その時の無線経路を示す。

(a) スタート直後

スタート直後は、全移動局は、中継局 1（歩道橋の上に設置）を経由して基地局 1 と接続していた。全移動局と基地局間の距離は、約 490m である。



図 7.2.2-1 スタート直後(9:46:01)の各移動局の位置情報

(b) スタートから 2 分後

直接基地局 1 と接続した移動局が 3 台。中継局 1 を経由して基地局に接続した移動局が 1 台、移動局 3 を経由して基地局 1 と接続した移動局が 3 台となった。これは、基地局 1 からのビーコン信号を受信できた移動局が 4 台（中継局 1、移動局 3、4、7）で、この中でビーコン信号を中継送信できたのが中継局 1 と移動局 3 である。他の移動局は、この 2 台からのビーコン信号を受信して、センサ情報の伝送経路（マルチホップ）を確定させている。マルチホップ機能が無ければ、この 4 台は基地局と接続できなかった可能性がある。基地局と移動局間の通信距離は、約 250m である。



図 7.2.2-2 2 分後 (9:48:01) の各移動局の位置情報

(c) スタートから 3 分後

基地局と移動局の距離が近くなり、全ての移動局が、直接基地局 1 と接続した。



図 7.2.2-3 3 分後 (9:49:01) の各移動局の位置情報

(d) スタートから 6 分後

各移動局は、中継局 2 または移動局を経由して基地局 1 と接続した。各移動局が基地局から離れ、中継局 2 を必ず経由している。中継局 2 は、基地局からのビーコン信号を受信して、中継送信している。中継局 2 のビーコン信号を受信して、中継送信できたのは、移動局 7 と移動局 6 である。それ以外の移動局はこの 2 台に接続されている。また、移動局 1 は、基地局 1、中継局 2、移動局 7、移動局 4 を経由してビーコン信号を受信している。



図 7.2.2-4 6 分後 (9:52:01) の各移動局の位置情報

(2) 基地局 2 と各移動局間のマルチホップの評価

図 7. 2. 2-5 と図 7. 2. 2-6 に基地局 2 と移動局の通信開始時(9:56:41)と開始時から 3 分後(9:59:41)の各移動局の位置情報とその時の無線経路を示す。

(a) 通信開始直後

基地局 2 と移動局 1 の距離が最も近く、他の移動局は、移動局 1 を経由して基地局 2 と接続した。移動局 1 のビーコン信号を受信したのは移動局 4 である。他の移動局は、移動局 4 のビーコン信号を受信し、移動局 4 と接続している。移動局 7 は、移動局 3、移動局 4、移動局 1 を経由して基地局 2 に接続している。マルチホップの段数は 4 段である。



図 7. 2. 2-5 通信開始時(9:56:41)の各移動局の位置情報

(b) 通信開始から 3 分後

基地局 2 には、中継局 3 と移動局 3 が接続している。基地局 2 のビーコン信号を直接受信できたのは、この 2 台だけである。中継局 3 には、移動局 7 が接続し、その移動局 7 に移動局 5、移動局 6 が接続している。また、移動局 3 には、移動局 1、移動局 2、移動局 4 が接続している。マルチホップの段数は 3 段までである。

移動局 3 は、基地局 2 からの距離は遠いが、木曽川沿いの平坦な公園なので、障害物が無く直接基地局 2 のビーコン信号を受信できたものと思われる。



図 7. 2. 2-6 3 分後(9:59:41)の各移動局の位置情報

(1)、(2)の結果から以下のことが確認できた。

- ・ 基地局と移動局が近距離であれば 1 ホップで直接通信を行う。
- ・ 基地局と移動局の距離が離れるとマルチホップの機能が利用される。基地局からのビーコン信号を移動局が中継送信するが、中継送信するためのスロット期間で 2 台の移動局がビーコン信号を中継送信できたことを確認できた。どの移動局が中継送信できるかは、キャリアセンスのランダム待ち時間によるので（早い者勝ち）、必ずしも基地局と移動局の距離には関係しないと思われる。
- ・ マルチホップの段数としては、4 段のマルチホップを確認できた。

7.2.3 通信品質

犬山マラソンの実験で取得したログデータの通信成功回数、データ欠損数、再送データリカバリ数を確認し、通信品質を評価した。

本検証で使用する用語の定義を以下に示す。

・全パケット数	・ ・ ・	ログデータ取り込み開始から終了までのデータ個数
・通信成功回数	・ ・ ・	基地局に届いた回数
・データ欠損数	・ ・ ・	全パケット数から通信成功回数を引いた回数
・再送データ付加数	・ ・ ・	通信成功回数の中で再送を含んでいた回数
・再送データリカバリ数	・ ・ ・	欠損したデータが再送によって救われた個数
・再送でリカバリできなかった数	・ ・ ・	再送しても救われなかった個数
・通信成功率	・ ・ ・	通信成功回数/全パケット数
・データ欠損率	・ ・ ・	データ欠損数/全パケット数
・データ取得率	・ ・ ・	基地局で取得できたデータ数/全パケット数
・最長通信距離	・ ・ ・	基地局から移動局までの最長距離
・最長通信距離時のホップ数	・ ・ ・	最長通信距離でのホップ数

(1) 基地局 1 と移動局 3 の通信におけるデータ欠損率

基地局 1 で収集した移動局 3 のログデータを、スタート直後から約 6 分経過（以下、「区間 1」と呼ぶ）するまでのログデータと、それ以降のログデータ（以下、「区間 2」と呼ぶ）に 2 分割し、その 2 つの区間毎に通信品質をまとめた。

二つの区間での移動局 3 の位置情報を図 7.2.3-1 に、そして通信品質の結果を表 7.2.3-1 に示す。区間 1 ではデータ欠損率が 48%と高い数値を示した。それに対し区間 2 ではデータ欠損率は 9.5%と低くなった。ただし、再送処理により、リカバリされたデータを含めるとセンサデータの取得率は、区間 1 では約 80%、区間 2 では約 95%となり、本技術試験で提案した再送処理の効果が確認できた。特に、基地局と移動局が直接通信する時（1 ホップ時）は、通信距離が近くて、通信品質が良い状態なので、より多くの再送データ（8 秒分）を送信できる。

移動局 7 台の結果を以下の表 7.2.3-2 と表 7.2.3-3 に示す。残り 6 台の移動局も移動局 3 と同じ傾向である。

区間 1 で通信品質が劣化している原因は、マラソンのスタート直後であると思われる。本試験のためのランナーは、一般のランナーの邪魔にならないように、集団の最後からスタートすることになった。中継局 1 と実験ランナーの間に一般ランナーが密集しており、一般ランナーが通信品質の悪化の原因となった可能性がある。区間 2 ではランナーの密集状態が緩和され、通信しやすい状況となったためデータ欠損率が低くなったと考える。



図 7. 2. 3-1 各区間での移動局 3 の位置情報

表 7. 2. 3-1 基地局 1 と移動局 3 の通信品質

	区間 1	区間 2
全パケット数 (回)	346	283
通信成功回数 (回)	180	256
データ欠損数 (個)	166	27
再送データ付加数 (回)	80	20
再送データリカバリ数 (個)	96	18
再送でリカバリできなかった数 (個)	68	9
通信成功率 (%)	52. 02	90. 45
データ欠損率 (%)	47. 97	9. 54
データ取得率 (%)	80. 35	96. 82
最長通信距離 (m)	730	530
最長通信距離時のホップ数 (回)	3	3

表 7.2.3-2 区間 1 の 7 台の通信品質

移動局	1	2	3	4	5	6	7
全パケット数 (回)	346	340	346	346	342	343	343
通信成功回数(回)	194	181	180	178	178	178	173
データ欠損数(個)	151	158	165	167	163	164	169
再送データ付加数 (回)	73	71	80	86	78	88	87
再送データリカバリ数(個)	74	80	96	90	77	90	93
再送でリカバリできなかった数(個)	77	67	68	72	94	74	90
通信成功率 (%)	50.06	53.23	52.02	51.44	52.04	51.89	50.43
データ欠損率 (%)	43.93	46.76	47.97	48.55	47.95	48.10	49.56
データ取得率 (%)	77.75	80.29	80.35	79.19	72.51	78.42	73.76
最長通信距離(m)	745	740	730	730	730	720	735
最長通信距離時のホップ数(回)	4	3	3	3	3	3	2

表 7.2.3-3 区間 2 の 7 台の通信品質

移動局	1	2	3	4	5	6	7
全パケット数 (回)	281	283	283	281	283	281	283
通信成功回数(回)	250	249	256	250	251	261	257
データ欠損数(個)	31	34	27	31	32	20	26
再送データ付加数 (回)	16	21	20	20	15	16	16
再送データリカバリ数(個)	17	26	18	17	15	14	21
再送でリカバリできなかった数(個)	11	10	9	14	16	6	5
通信成功率 (%)	88.96	87.98	90.45	88.96	88.69	92.88	90.81
データ欠損率 (%)	11.03	12.01	9.54	11.03	11.30	7.11	9.18
データ取得率 (%)	96.08	96.47	96.82	95.02	94.34	97.86	98.23
最長通信距離(m)	520	440	530	500	485	470	455
最長通信距離時のホップ数(回)	4	3	3	3	3	3	2

(2) 基地局 2-移動局 3 間での通信品質

基地局 2 で収集した移動局 3 のログデータから通信品質をまとめた。移動局 3 の位置情報を図 7.2.3-2 に、そして通信品質の結果を表 7.2.3-4 に示す。データ欠損率が 10%程度を示し、データ取得率は、95%を超えている。基地局 1 の区間 2 と同様の結果になった。移動局 7 台の通信品質を表 7.2.3-5 に示す通り、区間 2 と同様の結果である。

この結果から、スタート時点のランナーの密集状態（基地局 1 の区間 1）を除けば、本試作機では、データ欠損率が 10%程度での無線通信が期待できると思われる。



図 7.2.3-2 移動局 3 の位置情報

表 7.2.3-4 基地局 2-移動局 3 間の通信品質

	往路
全パケット数 (回)	282
通信成功回数 (回)	252
データ欠損数 (個)	30
再送データ付加数 (回)	24
再送データリカバリ数 (個)	47
再送でリカバリできなかった数 (個)	8
通信成功率 (%)	89.36
データ欠損率 (%)	10.63
データ取得率 (%)	97.16
最長通信距離 (m)	750
最長通信距離時のホップ数 (回)	4

表 7.2.3-5 7 台の通信品質

移動局	1	2	3	4	5	6	7
全パケット数 (回)	278	282	282	282	282	282	282
通信成功回数(回)	246	216	252	257	255	256	251
データ欠損数(個)	31	66	30	25	27	26	31
再送データ付加数 (回)	26	38	24	17	15	14	44
再送データリカバリ数(個)	86	73	47	44	39	49	44
再送でリカバリできなかった数(個)	8	38	8	7	6	0	3
通信成功率 (%)	88.48	76.59	89.36	91.34	90.42	90.78	89
データ欠損率 (%)	11.51	23.40	10.63	8.86	9.57	9.21	10.99
データ取得率 (%)	97.12	86.52	97.16	97.51	97.87	100	98.93
最長通信距離(m)	560	780	750	710	670	615	665
最長通信距離時のホップ数(回)	2	4	4	4	3	5	2

7.2.4 受信信号レベルと通信距離の関係

全ログデータより基地局と直接（1 ホップで）通信しているログデータを抜き出し、そこから受信信号レベル (RSSI) と基地局と移動局間距離との関係进行评估した。一般に RSSI と通信距離に相関関係がある。基地局 1 と移動局 3 の RSSI と通信距離の関係を図 7.2.4-1 に示す。また、基地局 2 と移動局 3 の RSSI と通信距離の関係を図 7.2.4-2 に示す。

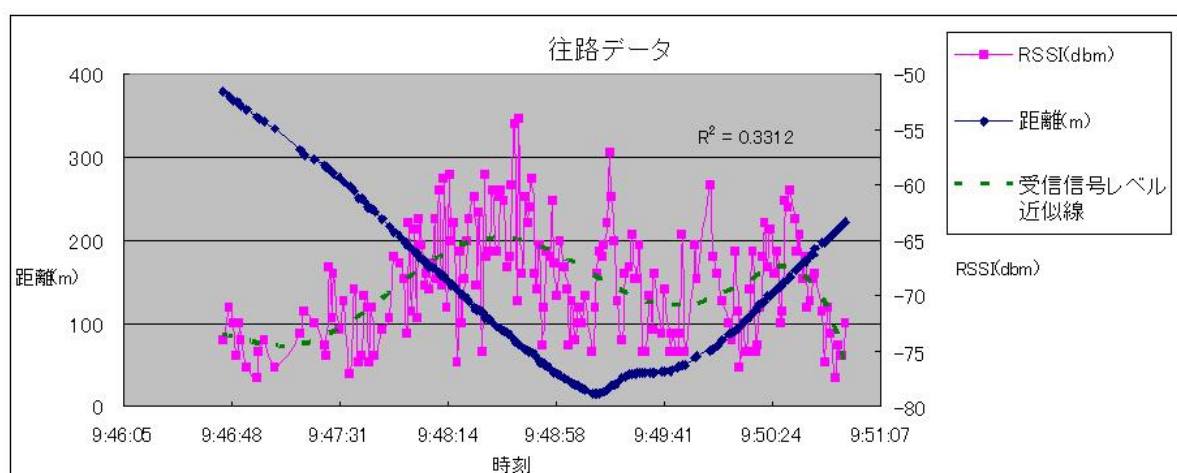


図 7.2.4-1 基地局 1 と移動局 3 の通信品質と通信距離の関係

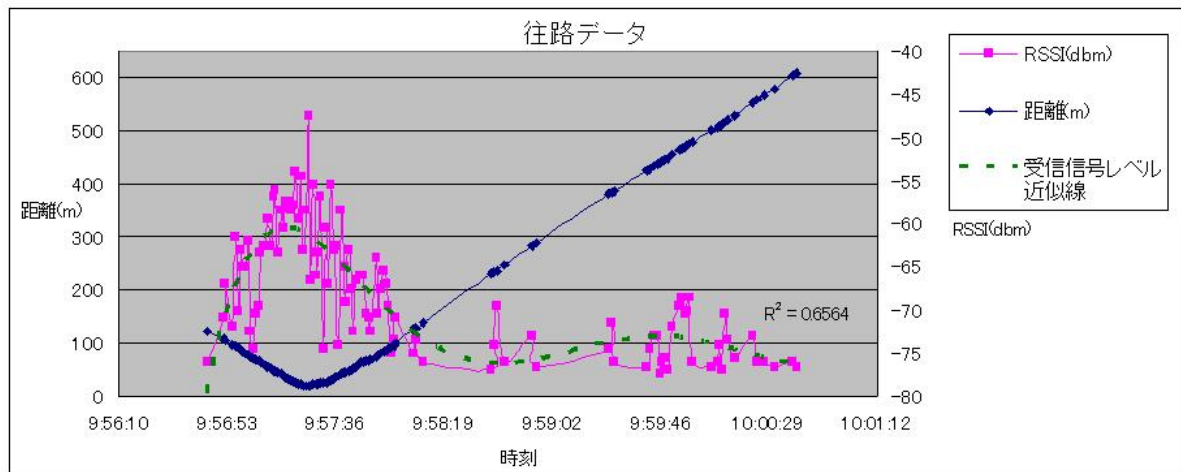


図 7.2.4-2 基地局 2 と移動局 3 の通信品質と通信距離の関係

どちらの場合も、基地局との距離が近くなるにつれて、受信信号レベルが大きくなり、逆に遠ざかると小さくなることを確認できた。基地局と移動局（ランナー）の距離が近い状態で受信信号レベルの値が終始大きく変動していた。これは移動局が動いていること、移動局を装着している腕も動いていること、他のランナーも動いていること、周辺の建造物や街路樹などとの位置関係も時々刻々と変化する事などの影響で、受信信号レベルが安定しないものと考ええる。

基地局 1 と移動局 3 の通信に関して、基地局と移動局が最も接近する場所で受信信号レベル (RSSI) が全体的に低下しているが、基地局 1 と移動局 3 の間に周辺の建物が入ったためだと思われる。

7.2.5 センサ情報の取得結果

試験中の移動局 1 から取得した脈波センサの計測結果を図 7.2.5-1 に示す。スタート後に脈波数が高くなり、ゴール後に低くなっていることが分かる。競技期間中、高い脈拍数が計測されていることから、脈波センサからのデータを正しく取得できていることが分かる。

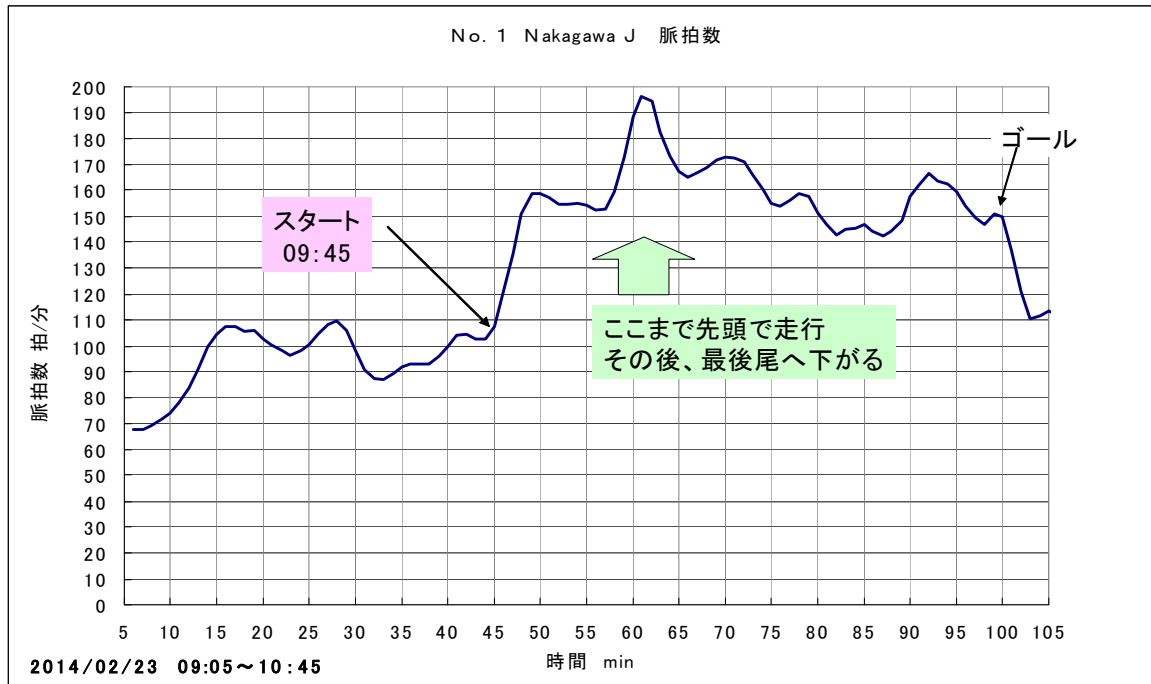


図 7.2.5-1 脈波センサの計測結果

7.2.6 送信総和時間の評価

犬山マラソンのスタート地点では、移動局 7 台分のデータが中継局 1 を介して基地局 1 と通信していた。このように特定の移動局や中継局に多数の移動局のデータが集中して伝送されるネットワーク構成ができることが考えられる。40 台以上の移動局に対し、同様の事象が 1 時間継続した場合、送信総和時間が電波法の規格値の 360 秒を超えてしまう。

(1) 送信総和時間超過の再現実験

基地局と 40 台の移動局からなるネットワークを擬似的に構成する。図 7.2.6-1 に本実験システムの構成を示す。移動局 2 に 39 台分の移動局（移動局 2 から移動局 40）の機能を持たせる。センサ情報を移動局 2 から 39 台分送信し、このセンサ情報を移動局 1 が中継して、基地局に伝送させる実験を行う。

この時の移動局 1 のパケット送信時間を図 7.2.6-2 に示す。実測した結果、移動局 40 台分の中継を行った場合、移動局 1 の 1 秒当たりの送信時間は 105.8ms となる。これにより 1 時間当たりの送信総和時間が 380.9 秒となり、電波法の規格値を超過することになる。

また、本試験機で採用したフレームフォーマットの場合には、休止時間の制限（データ送信時間が 2ms ~ 100ms の場合に、休止時間が 2ms 必要）の規格値を超過する場合があることを確認した。

例えば、移動局 4（移動局 n）が、移動局 3（移動局 n-1）のセンサ情報を 5 段目の中継スロット（移動局 3 のセンサ情報をマルチホップする最後のスロット）で中継送信し、次の自分のスロット（移動局 4 のスロット）の最初に自局のセンサ情報を送信する。このように、パケットを送信するスロット間の休止時間が短い場合に、同じ移動局が休止時間を待たずに連続してパケットを送信してしまうことが分かった。所定の休止時間を確保すると、各移動局に割り当てられたスロット時間が長くなり、移動局の収納台数に制限が掛かってしまう。

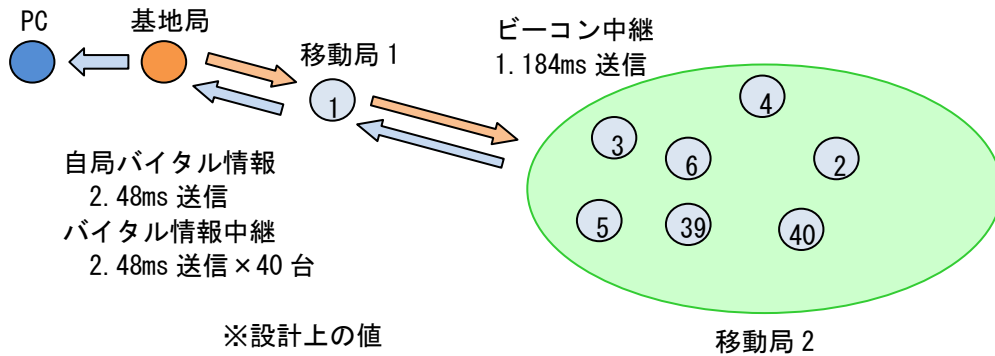


図 7.2.6-1 実験システムの構成

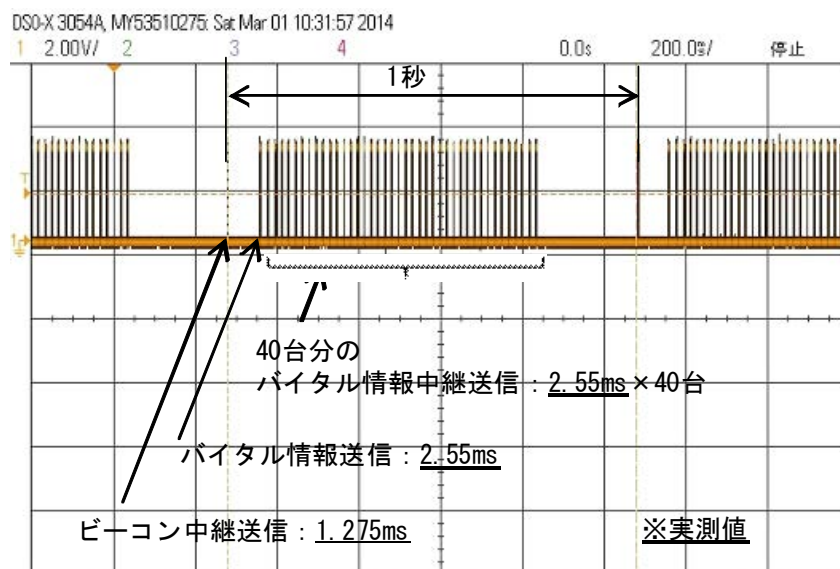


図 7.2.6-2 移動局 1 の送信時間のオシロ波形

7.3 まとめ

実際のマラソン大会で、920MHz 帯のマルチホップ通信の実験を行った。実際のマラソンでは、基地局と移動局が 1 ホップで通信できないことがあり、マルチホップ通信により、移動局のセンサ情報を基地局に伝送でき、その有効性を確認できた。基地局、中継局、移動局（ランナー）の位置関係に応じて、マルチホップの経路がリアルタイムで更新することを確認できた。また、マルチホップのネットワークの経路構成によっては、送信時間総和が、規格値を超える可能性があることを確認した。各試験項目のまとめは次の通りである。

マラソンを想定したマルチホップ事前試験で以下の評価を行った。

(1) 基地局の検索

送信周波数の異なる基地局を 2 台設置して、移動局がそれぞれの基地局のビーコン信号を検索して、検索した基地局と通信できることを確認した。

(2) マルチホップ実験

5 台以上の移動局を実際にランナーに付けて、5 ホップまでのマルチホップ通信ができることを確認した。

マラソンのタイム計測システムの通信の干渉実験を行い、双方の通信動作に干渉が無いことを確認した。

犬山マラソンの実証試験において、以下の機能を確認した。

(1) マルチホップ通信機能

実際のマラソン競技において、マルチホップの有効性を確認した。基地局と移動局が直接通信できなくても、周辺の中継局や他の移動局と通信ができれば、マルチホップ機能によりその移動局のデータを基地局に伝送できることを確認した。マラソンのように常に移動局が動いている応用において、1 秒周期での経路の更新条件で、通信成功率は 80%以上、再送によるリカバリを加えたデータ取得率は 95%以上になることが確認できた。ただし、マラソンのスタート地点のようにランナーが密集する場所では、通信品質が劣化することを確認した。

(2) データ再送機能

今回の提案した通信方式ではシンプルな再送機能を実装したが、ある程度のデータ欠損をリカバリでき、その効果を確認できた。

(3) 受信信号レベルと通信距離の関係

移動局と基地局間の距離と受信信号レベル（RSSI 値）の間に相関が確認されたが、移動局が動いていること、移動局を取り付けた腕が動いていること、周辺のランナーや建造物の位置関係が時々刻々と変化することから、受信信号レベルが安定せず、大きく変動することを確認した。RSSI 値を位置情報として使用する場合には注意が必要である。

(4) 脈波センサ情報の取得

実証試験中競技中、920MHz 帯無線通信を介して脈波センサのデータを取得できることを確認した。

(5) 送信時間総和の検証

マラソンのスタート地点のようにランナーが集まり、特定の移動局や中継局にセンサデータが集中するような場合があることを確認した。マルチホップのネットワークの経路構成によっては、送信時間総和が、規格値を超える可能性があることを確認した。また、本システムで採用したフレームフォーマットの場合、同じ移動局から連続してパケットを送信する場合に、送信パケット間の休止時間の規格値を超える場合があることを確認した。

[参考文献]

[7-1] 第 36 回読売犬山ハーフマラソン <http://www.inuyamahalf.com/> -

第8章 まとめ

8.1 技術試験のまとめ

8.1.1 利用ニーズのまとめ

本調査検討会では、マラソン、ウオーキング以外にも応用分野を検討したので、以下にまとめる。

(1) ビックデータ応用

生体情報の生データをリアルタイムで収集して、クラウドにデータをアップし、データベース化できれば、生データを共有して、いろいろなアプリケーションで解析サービスを提供できる可能性がある。

(2) マラソン、ウオーキング、サイクリングへの応用

920MHz 帯のマルチホップ通信は、グループで行動する応用に適している。マラソン、ウオーキング、サイクリングなど、参加者の情報が本部や、世話人など集まり、見守りや管理ができる応用には良いと思われる。

(3) 家畜などの動物の管理

大きな牧場などで、牛、馬などに付けて動物の位置や健康状態を管理するような応用もある。

(4) 災害時の避難誘導

災害時に高齢者の避難の時に、高齢者に無線機を付けることにより、誰がどこにいて、どのような健康状態かモニタリングする応用もある。災害時に携帯網が使えなくても、マルチホップ通信でカバーできる。

8.1.2 技術的条件及び通信方式のまとめ

920MHz 帯マルチホップ通信において、ARIB STD-T108 をベースとし、5 チャンネルを束ねた 1MHz の帯域で、50 台の移動局の生体センサ情報を伝送できる通信方式を提案した。表 8.1.2-1 に技術試験に用いた無線通信方式の諸元を示す。多重化方式としては、TDMA を採用し、マルチホップの構成は、ツリー型のネットワーク構成で、基地局から送信される 1 秒周期のビーコンに同期してネットワークを更新する方式とした。

表 8.1.2-1 技術試験に用いた無線通信方式の諸元

項目	機能
標準規格	ARIB STD-T108 ベース 同時利用チャンネルは 5 チャンネル
ネットワークの構成	ツリー型 1 秒周期でネットワーク更新
多重化方式	TDMA
伝送速度（物理層）	500kbps
変調方式	2 値 GFSK
ホップ数	～5 ホップ
無線通信距離	約 100m/1 ホップ、約 500m/5 ホップ

8.1.3 試験機の機能と性能のまとめ

920MHz 帯マルチホップの技術試験のために、基地局 2 台と移動局 10 台を試作した。基地局は、技術基準適合証明（TELEC）を取得し、移動局は実験試験局免許を取得して、実証試験を行った。

8.1.4 基礎技術試験および応用試験結果のまとめ

試作機を用いて、犬山マラソンにて応用試験を行った。

(1) 通信距離と伝送速度

データ伝送速度 500Kbps において、基地局-移動局間（移動局-移動局間）の無線通信距離は見通しで約 300m であることを確認した。

(2) マルチホップの効果

マラソンのような応用で、920MHz 帯のマルチホップ通信が設計通り動作することを確認した。マラソンのように常に移動局が動いている応用において、1 秒周期での経路の更新条件で、通信成功率は 80%以上、再送によるリカバリを加えたデータ取得率は 95%以上になることが確認できた。

(3) 受信信号レベルと通信距離の関係

移動局と基地局間の距離と受信信号レベル（RSSI 値）の間に相関が確認されたが、移動局が動いていること、移動局を取り付けた腕が動いていること、周辺のランナーや建造物の位置関係が時々刻々と変化することから、受信信号レベルが安定せず、大きく変動することを確認した。

(4) 中継局の効果

電池で動作する移動局（中継局）を設置することにより、容易にコース全体をカバーできる可能性があることを確認した。

(5) 通信干渉確認

920MHz 帯の他の機器と同じ周波数を利用しても、キャリアセンス機能により、お互いに干渉しないことを確認した。

マラソンのタイム自動計測器（利用周波数、125KHz、6MHz）には干渉しないことを確認した。

8.2 今後の課題と提言

8.2.1 標準規格への提言

技術基準適合証明（ARIB STD-T108）に関する提言は、次のとおりである。

(1) 送信時間総和についての検討

実際のマラソン大会で、920MHz 帯のマルチホップ通信の実験を行った結果、直接基地局との通信が出来ない位置からも移動局経由で通信が可能となるなどマルチホップ通信の効果が確認できた。

しかし、マルチホップのネットワークの経路構成によっては、基地局及び基地局の近くに設置された移動局、中継局に送信パケットが集中することがあり、その場合、集中した端末の送信時間総和が電波法令上の規格値を超える可能性があることが判明した。

実用時には用途によって、移動局の台数の増加、センサ情報の情報量の増加、再送制御の強化による送信パケットの増加など、送信時間の増加につながる様々な要素が考えられる。

920MHz 帯のマルチホップのネットワークを移動通信で利用する際、その利便性の更なる向上を図るためには、周波数・キャリアセンス時間の選択によっては規定の送信時間総和を越える可能性がある

ため、より詳細な検討を行うことが望ましい。

ただし、混信回避のためキャリアセンスが必須なので、ある機器の送信時間が長くなることにより、他の機器がキャリアセンスにより送信できなくなる可能性も高くなるため、送信時間総和については慎重な検討が必要である。

(2) 920MHz 帯マルチホップ無線システムの応用範囲拡大に関して

920MHz 帯の特定小電力無線局（アクティブ系小電力無線システム）として実用化を図る場合（920.5MHz～928.1MHz の周波数帯を使用し、キャリアセンス時間 $128\mu\text{s}$ （以上、5ms 未満）での送信時間総和は 360s/h 以下となる）、その応用が想定される用途と場面を想定して、送信時間総和について見直しを検討することが望ましい。

具体的な検討例については、付録 10 のとおり。

8.2.2 技術試験の課題

(1) 無線通信の信頼性向上

本技術試験で提案した 920MHz 帯マルチホップシステムは、シンプルな再送処理を実装したが、本再送処理でもある程度の欠損をリカバリできていた。実用化時は、より高度な再送処理、誤り訂正処理の検討が必要である。

マルチホップのネットワークを安定させるためには、過去のルート情報の保持機能や、無線通信品質（RSSI）等の情報を利用したマルチホップのルート管理、基地局から送付するビーコン間隔の最適化の検討も必要である。

基地局のアンテナを設置する高さの評価、移動局（ランナー）に付けるアンテナの場所の評価も必要である。腕だけでなく帽子、ゼッケン、腰等への装着することにより、通信品質を改善できる可能性がある。マルチパスの影響に関しても定量的な評価が必要である。

(2) ローミング

調査検討会で課題となっていた二つの基地局間でのローミング処理に関しては評価できていない。今後の課題である。

(3) リアルタイムでのモニタリング

今回の技術試験では、クラウドストレージを利用して、データ共有化したが、データの更新に時間が掛かることが分かった。実用化時には、公衆網も含めたリアルタイムのデータ伝送が可能なネットワークの設計が必要である。

(4) 実用化に向けた実験

920MHz 帯マルチホップシステムの実用化のためには、実際に 50 台～100 台規模での実証実験が必要であるが、今後は具体的なニーズに合わせた製品開発等を目指す中での検証が望まれる。

(5) スプリアス性能の向上

センサデータを無線伝送するためには、伝送速度を上げる必要があるが、5 チャンネルを束ねて 500Kbps の通信速度を実現するためには、近傍スプリアス発射強度において技術基準適合証明の規格値に対し余裕がなく、使用可能周波数も限定された。無線チップの性能向上と品質管理が望まれる

(6) 周波数有効利用のための送信アルゴリズム等の開発

920MHz 帯は特定小電力無線局として誰でも手軽に使用可能で、すでに電力やガス等の公共系スマー

トメーターも導入されており、既存利用者への影響は出来るだけ避ける必要がある。

マルチホップによるメリットを求めると送信時間総和が増大するという問題もあるが、可能な限り現行の規格内で必要な通信を可能とする送信制御方法の開発も必要である。

(7) 周辺機能・環境の充実

クラウド側にデータを蓄積して、これを活用するビックデータ、M2M(Machine to Machine)、モノのインターネット IoT (Internet of Things) をキーワードとする新しいアプリケーションが期待されている。これらのビジネスの立ち上げを加速するためには、生体情報の生データをクラウドに伝送して蓄積する技術は必要不可欠である。このためには、生データを伝送するための帯域が必要になる。また、無線通信技術に加えて、移動局でのデータ圧縮技術、生データを保持するロガー機能も必要となる。

一方、従来型のマラソン用専用機を目指すのであれば、移動局側にデータ解析処理を実装し、アラーム情報のみ無線伝送するという方法もある。この場合には、現状の標準規格内で実現できる可能性がある。

どちらの方向が一般利用者に受け入れられるかについては、今後の動向を見守っていきたい。いずれにしても、2.4GHz 帯よりも送信出力が出せて、電波の回り込みも期待される 920MHz 帯が使い易い周波数であることに異論はないと思われる。920MHz 帯の電波のより有効な利用が可能となることにより、スマートフォンとの連携だけでなく、ポストスマートフォンなどを想定した応用が、920MHz 帯で創生される可能性がより高まるとと思われる。ビックデータの収集やそのデータの利活用が大きな市場と予想される中で、920MHz 帯をより有効に活用できる技術的選択肢の一つとして大いに期待できる。

付 録

付録1 構成員名簿

(順不同 ・ 敬称略)

所 属		氏 名
愛知県立大学	情報科学部 教授	小栗 宏次 (座長)
名古屋工業大学	大学院工学研究科 情報工学専攻 准教授	岡本 英二 (副座長)
一般社団法人電波産業会	研究開発本部 主任研究員	野村 篤志
株式会社デンソー	研究開発3部 特定開発室 ME 担当課長	難波 晋治
リベラ株式会社	大阪支社長	本丸 勝也
愛知県ウォーキング協会	事務局長	光崎 栄次
マイクロ・トーク・システムズ株式会社	営業部 課長	野口 傑貴
マスプロ電気株式会社	開発部 技術主幹	小沢 寿行
株式会社日立製作所	情報・通信システム社 通信ネットワーク事業部 事業主管	木下 泰三
東朋テクノロジー株式会社	システム事業 事業統括	山本 賢市
沖電気工業株式会社	研究開発センタ スマート社会ビジネスイノベーション推進部 無線ビジネスイノベーション ユニット ユニットマネージャ	野崎 正典
パナソニックシステムネットワークス株式会社	システムソリューションズジャパンカンパニー 中部社 S E グループ グループマネージャー	小西 俊也

付録2 調査検討会の開催状況

1. 調査検討会

第1回調査検討会

日時：平成25年9月3日（火）14:00～16:00

場所：東海総合通信局7階共用会議室

議題

- 1 開会
- 2 構成員委嘱
- 3 東海総合通信局長挨拶
- 4 開催要綱案の承認について
- 5 座長選出
- 6 議事
 - (1) 検討スケジュールの確認について
 - (2) 利用ニーズ調査について
 - (3) 技術的条件及び通信方式の検討について
 - (4) 試作機の製作について
 - (5) 座長代理について
- 7 連絡事項、その他

第2回調査検討会

日時 平成26年1月9日（木）11:00～12:30

場所 ウィルあいち 会議室6

議題

- 1 第1回調査検討会の議事録の確認
- 2 議事
 - (1) 試作機製作の報告と機能・性能の紹介
 - (2) 基礎技術試験計画の確認、応用試験の実施方法の検討と確認
- 3 連絡事項、その他

第3回調査検討会

日時 平成26年3月5日（水）16:00～17:30

場所 ウィルあいち セミナールーム6

議題

- 1 第2回調査検討会の議事録の確認
- 2 議事
 - (1) 基礎技術試験結果の報告について
 - (2) 応用（実証）試験結果の報告（犬山マラソン）について
 - (3) 報告書の内容について

3 連絡事項、その他

第4回調査検討会

日時 平成26年3月19日(水) 14:00~15:30

場所 ウィルあいち 会議室6

議題

1 第3回調査検討会の議事録の確認

2 議事

(1) 報告書の確認 -

3 連絡事項、その他 -

2. 試作機のレビュー

日時：平成25年10月7日(月) 14:00~16:00

場所：名古屋工業大学23号館4階2342室

議題

1 「920MHz帯マルチホップセンサー無線機試作機」の機器仕様のレビュー

移動局は「キャリアセンス時間」、「キャリアセンスレベル」、「送信休止時間」及び「送信時間総和」の制限を無くす必要があったため、実験試験局免許の手続きを行った。その手続き内容を記載する。

下記内容を記載した申請書を作成し、実験試験局の免許申請を行った。

免許人の氏名又は名称 : 株式会社日立製作所

免許人の住所 : 東京都千代田区丸の内 1-6-6

無線局の種別 : 実験試験局

無線局の目的 : 実験試験用

通信事項 : 電波の利用の効率性に関する試験に係る事項
研究に関する事項

通信の相手方 : 免許人所属の実験試験局、免許人所属の無線設備

識別信号 : ひたちまるちほっぷじっけん 1~10

電波の型式 : F1D

周波数 : 922.4MHz ~ 928MHz まで 200kHz 間隔の周波数 29 波
(これらを最大 5 波束ねて使用)

空中線電力 : 20mW

無線設備の設置場所又は移動範囲

- ・ 常置場所 : 愛知県名古屋市中区栄 3-17-12 大津通電気ビル
- ・ 移動範囲 : 東海総合通信局管内
 - (a) 富山県富山市月岡町 3-6 立山科学工業株式会社
 - (b) 富山県富山市下番 30 立山マシン株式会社内
 - (c) 神奈川県川崎市幸区鹿島田 1-1-2
株式会社日立製作所 新川崎事業所内
 - (d) 東京都千代田区鍛冶町 1-8-3 神田 91 ビル 6 階
立山科学グループ 東京支社内

登録検査等事業者により、予備免許の内容に合致しているかどうかを点検し、工事落成した。

登録検査等事業者：株式会社日立国際八木ソリューションズ

2 値 FSK と 4 値 FSK（伝送速度：50kbps、単位チャネル：1）に設定し以下の項目を測定。

- ・ 周波数 : 規格値：±1.5ppm 以内
なお、922.4MHz、925.2MHz、928.0MHz の 3 波を代表して測定
- ・ 空中線電力 : 規格値：20mW +50%／-50%以内
- ・ 占有周波数帯幅 : 規格値：200kHz 以内
- ・ スプリアス発射又は不要発射の強度
: 規格値：対域外領域 100 μ W 以下、スプリアス領域 50 μ W 以下
- ・ 隣接 CH 漏洩電力 : 参考値：-15dBm 以下
- ・ 総合試験 : 1 対 1 で通信できることを確認した。

結果、以下のとおり移動局 10 台の実験試験局免許を取得した。

③ 免許の番号、免許の年月日及び有効期間

- ・ 免許の番号 : 海実第 2980 号 ～ 海実第 2989 号
- ・ 免許の年月日 : 平成 26 年 2 月 5 日
- ・ 免許の有効期間 : 平成 26 年 3 月 31 日まで

付録4 試作機の回路図

本試作機の移動局、基地局の回路（ブロック）図を以下に示す。

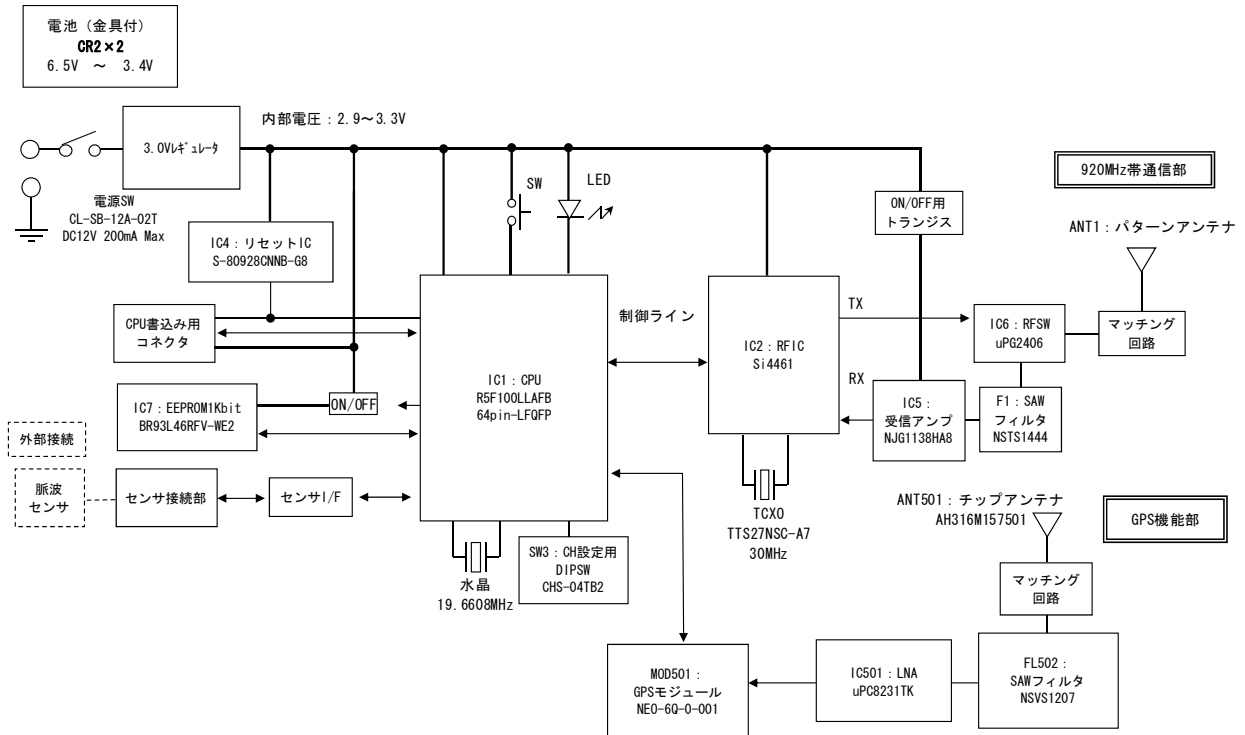


図 4-1 移動局 回路ブロック図

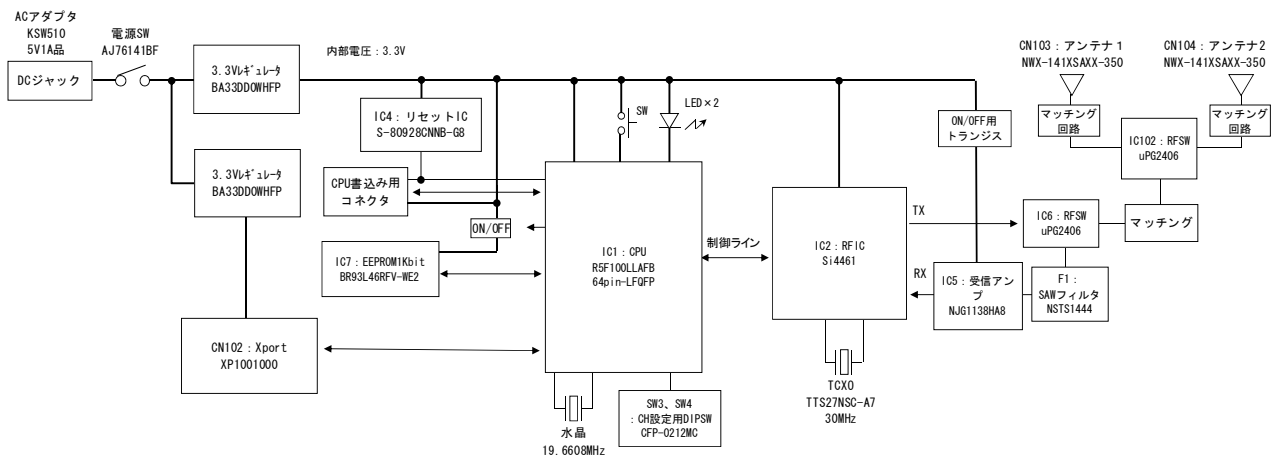


図 4-2 基地局 回路ブロック図

付録5 基地局の LAN のノイズ対策

本試作機の基地局が、LAN モジュールを動作させることで、受信電界強度が悪化した。基地局の LAN モジュールからのノイズ対策として、基板上に以下の様に LAN モジュール及び周辺回路を覆うシールドケースを追加した。その結果、LAN モジュールが動作していない状態と同等の性能を得ることが出来た。

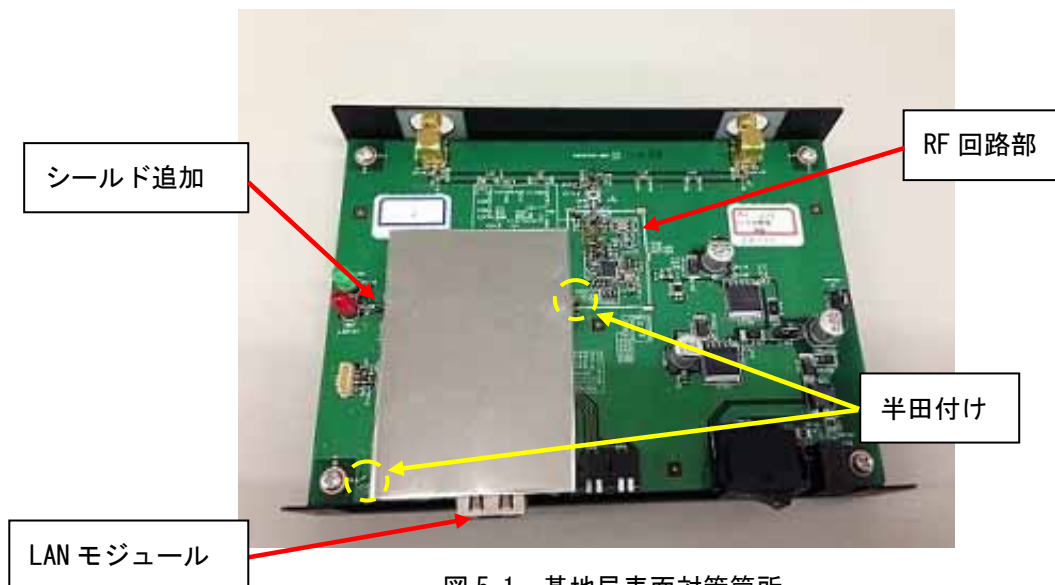


図 5-1 基地局表面对策箇所

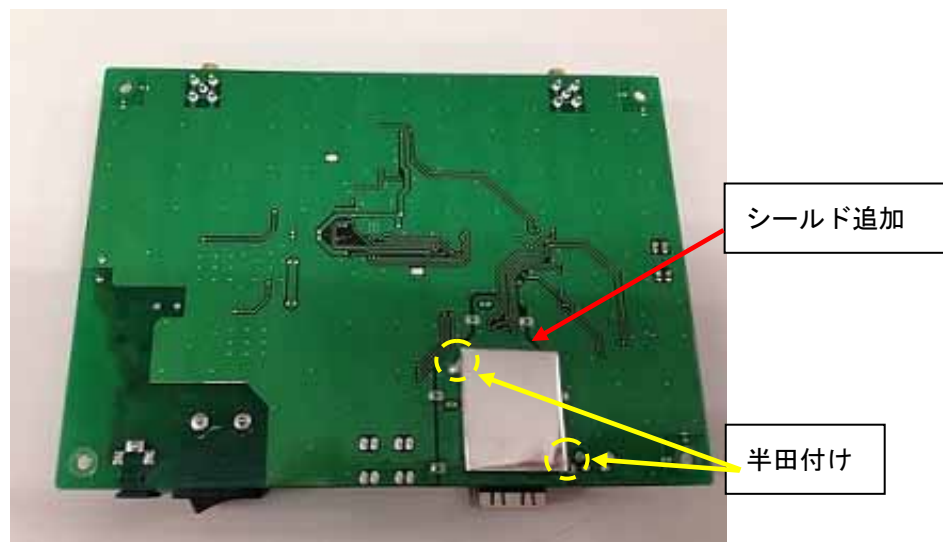


図 5-2 基地局裏面对策箇所

付録6 マラソン前の事前実験の補足資料

マラソン前の事前実験で、以下の実験を行った。補足資料として掲載する。

(1) 3 ホップ動作の実験

南工場周辺の狭い空間で3ホップ動作を確認するために、基地局、移動局の送信出力を以下の様に変更する。

・基地局：11dBm ⇒ -6dBm 移動局：12dBm ⇒ 6dBm

基地局を南工場正面玄関前に設置し、3人が移動局を左腕に取付け、南工場周囲をジョギング程度のスピード（約6～8km/h）で走行する。

実験結果を以下に記載する。3人のランナーがジョギング時、3ホップの動作の確認ができ、基地局通過前後で、想定通りにルート変更したことを確認した。

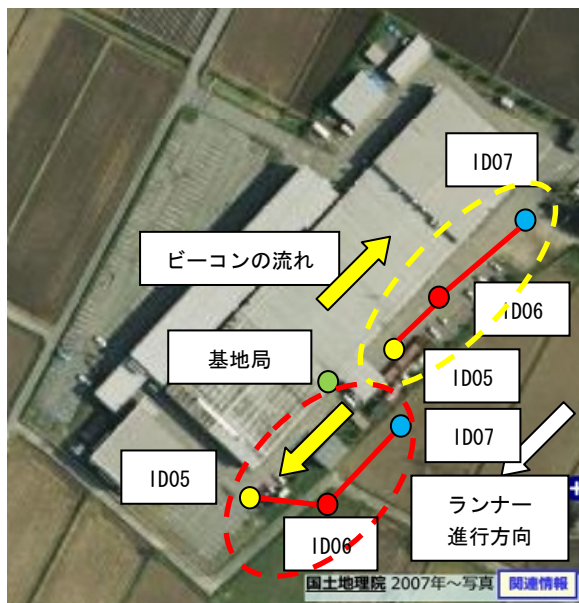


図 6-1 3 ホップ動作確認

表 6-1 3 ホップ動作確認

黄色点線で囲んだ配置時、各移動局ルート情報

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
05	11:12:03	05>基	36.63460333	137.2633005
06	11:12:03	06>05>基	36.63475533	137.2634763
07	11:12:03	07>06>05>基	36.63499733	137.2638568

※3ホップ時のビーコンのルート（基>05>06>07）

赤色点線で囲んだ配置時、各移動局ルート情報

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
07	11:12:31	07>基	36.63440017	137.2633937
06	11:12:31	06>07>基	36.63413850	137.2630638
05	11:12:31	05>06>07>基	36.63413567	137.2627907

※3ホップ時のビーコンのルート（基>07>06>05）

(2) 実験ランナーの追い越し時の3ホップ動作

南工場周辺の狭い空間で3ホップ動作を確認するために、基地局、移動局の送信出力を以下の様に変更する。

・基地局：11dBm ⇒ -6dBm 移動局：12dBm ⇒ 6dBm

基地局を南工場正面玄関前に設置し、3人が移動局を左腕に取付け、南工場周囲をジョギング程度のスピード（約6～8km/h）で走行する。基地局を通り過ぎた辺りで追い越しを行い、ルート変更を確認する。各移動局の位置は次の通りである。

・スタート順位：ID05, 06, 07 → 追い越し後順位：ID07, 06, 05

実験結果を以下に記載する。3人のランナーがジョギング時、3ホップの動作の確認ができた。追い

越しが発生していない場合、(1)の3ホップ動作と同じ結果となるが、追い越しを行い、ID07 と ID05 が入れ替ったこと。これは、設計通りのルート変更である。

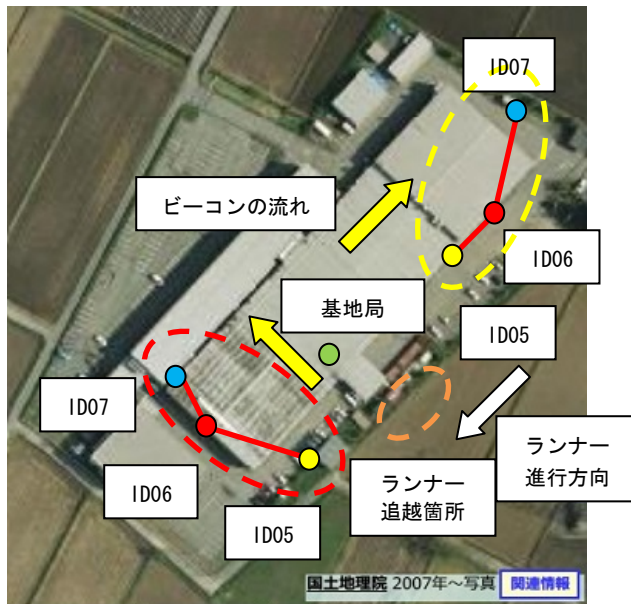


図 6-2 3 ホップ動作確認（追越あり）

表 6-2 3 ホップ動作確認（追越あり）

黄色点線で囲んだ配置時、各移動局ルート情報（追い越し前）

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
05	11:52:11	05>基	36.63482067	137.2635053
06	11:52:11	06>05>基	36.63496683	137.2636627
07	11:52:11	07>06>05>基	36.63536733	137.2637583

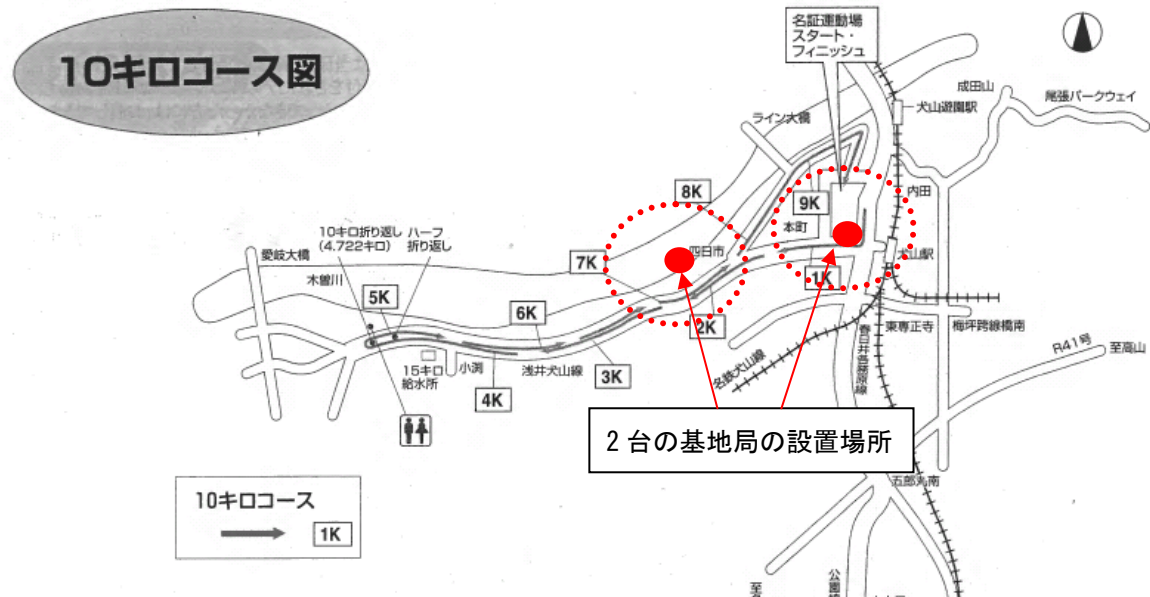
※3ホップ時のビーコンのルート（基>05>06>07）

赤色点線で囲んだ配置時、各移動局ルート情報（追い越し後）

ID	時刻	ルート情報	GPSデータ	
05 -	11:53:23	05>基 ※追い越しがなければ 05>06>07>基	36.63423767	137.2628713 -
06	11:53:23	06>05>基 ※追い越しがなければ 06>07>基	36.63433267	137.2626582 -
07 -	11:53:23	07>06>05>基 ※追い越しがなければ 07>基	36.63448700	137.2625313 -

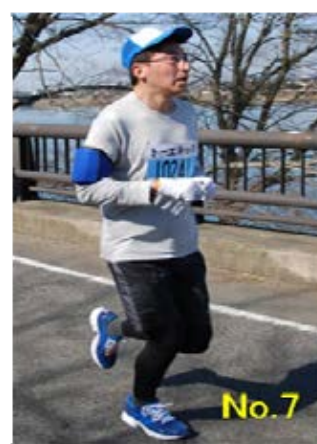
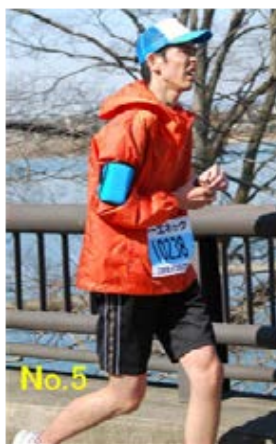
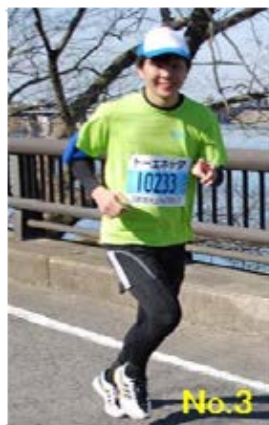
※3ホップ時のビーコンのルート（基>05>06>07）

付録7 犬山マラソンのコースの概要



付録8 犬山マラソンの実験の風景

(1) マラソンの実験に参加されたランナーの皆さん。番号は装着した移動局の番号である。



(2) 本部の風景



本部に設置されたモニター用 PC



モニター画面の拡大図

(2) 木曽川沿いのマラソンの風景



木曽川沿いを走るランナー

付録9 犬山マラソンの実験結果の補足資料

犬山マラソンの実験結果の補足資料を以下に掲載する。

(1) 基地局 1-各移動局間のマルチホップ動作

スタート直後から 1 分後 (9:47:01)、4 分後 (9:50:01)、5 分後 (9:51:01) の各移動局の位置情報と、その時の無線通信のホップ経路である。その結果を図 9-1、図 9-2、図 9-3 に示す。

図 9-1 がスタート直後から 1 分後 (9:47:01) の状態である。この時は、中継局 1 を介さずに直接基地局 1 と接続する移動局が 4 台。移動局 4 を介して、基地局 1 と通信を行っていた移動局が 3 台であった。移動局 1、5、7 は基地局 1 からのビーコン信号を受信できなかったため、移動局 4 と接続したものと想定される。この場合、基地局 1 のビーコン信号を中継送信できたのは移動局 4 である。



図 9-1 1 分後 (9:47:01) の各移動局の位置情報

図 9-2 が 4 分後 (9:50:01) のネットワークの状態である。この時は、基地局 1 に直接 5 台の移動局が接続している。先行している移動局 1、3 は移動局 6 を介して基地局 1 と通信している。この場合、基地局 1 のビーコン信号を中継送信できたのは移動局 6 である。



図 9-2 4 分後 (9:50:01) の各移動局の位置情報

図 9-3 は、5 分後(9:51:01)のネットワークの状態である。先行している移動局 1、3 以外の移動局は、基地局 1 と直接通信している。移動局 3 は、移動局 2 を経由して基地局 1 と接続し、移動局 1 は、中継局 2 と経由して、基地局 1 と接続している。この場合は、基地局 1 のビーコン信号を移動局 4 と中継局 2 が中継送信できている。



図 9-3 5 分後(9:51:01)の各移動局の位置情報

(2) 基地局 2-各移動局間のマルチホップ動作

通信開始時から 1 分後(9:57:41)と 2 分後(9:58:41)の各移動局の位置情報と、その時の無線通信のホップ経路を掲載する。その結果を図 9-4 と図 9-5 に示す。

図 9-4 に、1 分後(9:57:41)のネットワークの構成を示す。中盤のポジションに位置する移動局 2 以外の移動局は基地局 2 と直接通信している。移動局 2 は周辺ランナーの影響で基地局 1 のビーコン信号を受信できなかったと思われる。その代わりに、移動局 4 を経由して、基地局 2 と通信している。なお、基地局 2 のビーコン情報を中継送信できたのは移動局 4 である。



図 9-4 1 分後(9:57:41)の各移動局の位置情報

図 9-5 に 2 分後(9:58:41)のネットワークの状態を示す。全移動局は、中継局 3 を介して基地局 2 と通信を行っていた。



図 9-5 2 分後(9:58:41)の各移動局の位置情報

付録10 920MHz 帯マルチホップ無線システムの送信時間総和の検討

920MHz 帯マルチホップ無線システムの応用が想定される用途・場面毎の送信時間総和について検討した結果を以下の通りまとめる。

表 10-1 920MHz 帯マルチホップ無線システムの用途・場面毎の送信時間総和の検討結果

用途・場面	検討結果
(a) 機器を沢山収容できるネットワークへの応用	一つの無線ネットワークに収容できる機器の台数を増やす必要がある場合。例として広い牧場で牛や馬などの家畜の飼育情報（家畜の生体情報）を収集する場合に、特定の基地局にその情報が集約される場合、マルチホップ通信で、全てのセンサ情報が集約されてくると、本試験システムと同様に、基地局に近い無線機での送信時間が長くなる可能性がある。移動局（家畜）の数が増えれば増えるほど、基地局に近い無線機の送信時間が長くなる。 （例）2000 頭の家畜を管理し、各家畜から 1 分間に 1 回、64 バイトのデータを収集すると、全データが集約される無線中継局のデータ伝送速度は 17kbps となる。これをマルチホップ通信で収集する場合、同時使用のチャンネルを 1 チャンネルとすると伝送時間は 100kbps となり、送信時間総和 360s/h 以下で管理できる家畜の数は、1176 頭が上限になる。
(b) 中継局が有効な応用	電柱、高圧線、ガス管、水道管など社会インフラ系の設備は、一方向に長くなる設備が多い。このような設備のモニタリングや予防保全に、920MHz 帯でのマルチホップ通信（特にバケツリレーのようなネットワーク）を活用することを想定すると、マルチホップの最終段に全てのモニタリング機器のセンサ情報が集約されるが、送信時間総和の規定により通信頻度を落とすことが必要となってくる。 （例）1000 個のセンサのデータを 1 台の基地局に集約することを考える。配管などの予防保全には、加速度センサ（100Hz x 16bit x 3 軸）を利用する例もある。1 時間に 1 回、10 秒分の加速度データを収集する場合には、全センサのデータが集約される無線中継局のデータ伝送速度は 13kbps である。同時使用のチャンネルを 1 チャンネルとすると、伝送時間は 100kbps となり、送信時間総和 360s/h 以下で管理できるセンサの数は、77 台が上限になる。

表 10-1 920MHz 帯マルチホップ無線システムの用途・場面毎の送信時間総和の検討結果（続き）

用途・場面	検討結果
(c) 大量のデータ伝送が必要な応用	920MHz 帯アクティブ系小電力無線システムの 5 チャンネルを同時利用すれば 1MHz の帯域を確保することが可能である。この帯域をうまく利用すれば、生体情報、カメラの画像、加速度データなどデータ量の多い応用にも利用できるが、一定量以上のデータ伝送を行うには規定の送信時間総和を越える場合がある。 （例） 3 軸の加速度センサは、サンプリング周波数、解像度、軸数に応じて、伝送速度が異なる。MEMS 型センサの場合には、伝送速度は、4.8kbps (100Hz x 16bit x 3 軸) であるが、高周波成分までセンシングできるセンサの伝送速度は、48kbps (1kHz x 16bit x 3 軸) や 480kbps (10kHz x 16bit x 3 軸) のものもある。 本試作機と同様に伝送速度が 500kbps の無線機を採用した場合でも、送信時間総和 360s/h 以下では、50kbps の伝送速度しか確保できないが、送信時間総和の制約が無ければ、周波数の高いセンサの情報も送信できる可能性がある。
(d) リアルタイム性が重要な応用	ロボットや工事現場用の機器の遠隔制御など、カメラ画像と見ながら、リアルタイムで制御するような応用の場合には、大量のデータをリアルタイムで送信する必要がある。特にきめ細かな制御を行う場合には、特定のタイミングで、すばやく解像度の高い画像を伝送する必要があるが、この場合、送信時間総和やキャリアセンス時間によりリアルタイム性が制約される。 （例）カメラ画像の伝送速度は、画像を圧縮すると、解像度によるが 200kbps ~800kbps で利用されている。本試作機と同様に伝送速度が 500kbps の無線機を採用した場合でも、送信時間総和 360s/h 以下では 50kbps の伝送速度しか確保できないが、送信時間総和の制約が無ければ、これらの画像伝送に利用できる。 ※ただし、キャリアセンスが必須であるためリアルタイム性は制限される。
(e) 遅い伝送速度への応用	物理層でのデータ伝送速度を遅くする（数十 bps～数百 bps）ことにより、無線回路での受信感度の向上が期待でき、無線通信距離の長距離化や通信の信頼性の向上を図ることが可能となる。この場合も、データ伝送速度を遅くすると、送信時間が長くなるため、送信時間総和による制約を受ける可能性がある。 （例） 64 バイトのデータを 500bps で伝送する場合には、伝送時間が 1.02 秒必要である。このデータを 10 台のセンサノードが 1 分周期で送信する場合、これらのデータをマルチホップする無線中継局は、1 時間当たりの送信時間が 612 秒（1.02 秒 x 10 台 x 60 回）になり、360s/h を超えてしまう。

付録11 用語解説

No.	用語	内容（意味）
1	ARIB (Association of Radio Industries and Broadcast)	社団法人電波産業会。通信・放送分野での電波利用システムの実用化と普及を促進し産業の発展を目指すために、電波の有効利用や無線技術の調査研究・研究開発、さらには国際標準機関と連携した標準規格の策定などを行っている。
2	BER(Bit Error Rate)	デジタル信号の評価要素のひとつでビットの誤り率を表す
3	bps (bits per second)	通信回線などのデータ転送速度の単位。1 秒間のデータ転送ビット数
4	CSMA(Carrier Sense Multiple Access)	搬送波感知多重アクセス方式。データを送信したいノード(機器)は無線通信状況を監視し(Carrier Sense)、他の機器が電波を発信していないことを確認し、空きを確認して、送信を開始する方式。
5	FSK (frequency shift keying)	周波数搬移変調。データが0 のとき搬送波を低周波数、1 のとき高周波数に変化させる方式。
6	GFSK (Gaussian filtered frequency shift keying)	ベースバンド信号をガウスフィルタで帯域制限した位相連続 FSK。
7	GPS (Global Positioning System)	全地球測位網。上空にある数個の衛星からの信号を GPS 受信機で受け取り、受信者が自身の現在位置を知るシステム。
8	GPS ウオッチ	GPS 機能を搭載した時計
9	IoT(Internet of Things)	モノのインターネット
10	LAN (Local Area Network)	ケーブルや無線などを使って、同じ建物の中にあるコンピュータや通信機器、プリンタなどを接続し、データをやり取りするネットワーク。
11	M2M (Machine to Machine)	機械と機械が通信機械がを介して相互に通信し合う通信形態。
8	PAN(Personal Area Network)	1 人の人間が身に付けたり机の上に並べて使うくらいの範囲のネットワーク
9	PER (Packet Error Rate)	パケット誤り率。送信したパケット数に対し、エラーとなり受信できなかったパケット数の割合をパーセンテージで示した物。
10	TDMA(Time Division Multiple Access)	時分割多元接続方式。携帯電話などの無線通信に使われる方式の一つ。1 つの周波数を短時間ずつ交代で複数の発信者で共有する方式。
11	WiMAX	無線通信技術の規格 (IEEE 802.16-2004 規格)

用語解説（続き）

No.	用語	内容（意味）
12	3G モジュール	国際電気通信連合（ITU）が定める「IMT-2000」（International Mobile Telecommunication 2000）規格に準拠した通信システムを搭載したモジュール
13	アクティブタグ	無線 IC タグ (RFID) の種類の一つで、電池を内蔵している IC タグ。数十 m 程度の長距離での通信が可能である。
14	スマートメーター	電力をデジタルで計測、管理する電力量計である。通信機能を持ち、電力データの収集の自動化を可能にする。
15	スループット	単位時間当たりの処理能力を示す。
16	センサーネットワーク	センサ情報を収集する無線端末から構成される無線ネットワーク。無線端末をいろいろな場所に設置して、それらの無線端末から環境データや物理データを収集することが可能な無線ネットワーク。
17	パッシブタグ	自らは電源を持たないためタグ。リーダ/ライタのアンテナが放つ電波で電磁誘導を起こすなどの手段で駆動され、電波の受発信を行う。
18	ビーコン	自らの存在を知らせるために発する無線信号のこと
19	ビックデータ	インターネットの普及、コンピュータの処理速度の向上、ディスクの大容量化などに伴い蓄積される大容量のデジタルデータのこと。これらの大容量のデータを解析して、これまで予想できなかったルールやパターンを発見できる可能性がある。
20	マルチホップ	バケツリレーのような形で、無線機と無線機の間でデータを次々と伝送していく方式。
21	電界強度	電波が伝搬したときの、ある地点におけるその電波の電界または磁界の強さをいう。
22	一斉同報	相手を特定しないで、すべての機器に同じデータを送ること。ブロードキャストともいう。
23	外部ストレージ	コンピュータの主要な構成要素の一つで、データを永続的に記憶する装置。磁気ディスク（ハードディスクなど）や光学ディスク（CD/DVD/Blu-ray Disc など）、フラッシュメモリ記憶装置（USB メモリ/メモリカード/SSD など）を指す。

920MHz 帯マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した移動無線通信
システムに関する調査検討報告書

（請負名称：920MHz 帯マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した
低速度移動体通信用無線システムの調査検討）

平成 26 年 3 月

920MHz 帯マルチホップセンサーネットワーク技術を応用した移動無線通信
システムに関する調査検討会

発 行 総務省 東海総合通信局

連絡先 総務省 東海総合通信局 無線通信部 企画調整課

〒461-8795 名古屋市東区白壁一丁目 15 番 1

名古屋合同庁舎第 3 号館

TEL 052-971-9143 FAX 052-971-9395

URL <http://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/>