

低遅延型デジタル特定ラジオマイクの技術的 条件に関する検討

はじめに

現在の特定ラジオマイクの現状

特定ラジオマイク(A型ラジオマイク)の主な諸元

用途の 概念と種別	アナログ		デジタル
	モノラルマイク	ステレオ イヤーマニター	モノラルマイク
使用周波数帯	779~788 MHz (9 MHz:A2 帯) 797~806 MHz (9 MHz:A4 帯)		770~806MHz (36MHz:A1~A4 帯)
空中線電力	10mW 以下		50mW 以下
通信方式	単向通信、 同報通信		
変調方式	周波数変調		位相変調、周波数変調 直交振幅変調
コンパンダ	無	有	無あるいは有
占有周波数 帯域幅	330 kHz	110 kHz	250 kHz
遅延時間	μ s級	μ s級	μ s級
9MHz あたりの 同時利用本数	7	10	4+ α
特徴	低遅延 リニア	低遅延 コンパンダ	低遅延 ステレオ

α :モノラルのイヤーマニターを2本

これらに代わる低遅延型デジタル方式はまだ存在しない。

低遅延型デジタル特定ラジオマイクにおける 要求条件の検討

特定ラジオマイクのユーザー要求条件

- 放送局及び特定ラジオマイク利用者連盟加入団体から得た35ケースのアンケート回答から、特定ラジオマイクとイヤーマニターのユーザー要求条件をまとめた。
- チャンネル数の要求条件では、劇場、ホールなどの屋内での運用例と放送中継、コンサートなど屋外での運用例は異なるが、必要なチャンネル数が大きい運用例を要求条件とした。

【ユーザー要求条件】

チャンネル数	同一場所で同時運用に必要なチャンネル数 特定ラジオマイク72ch(イヤーマニター10chを含む)での同時運用	
	屋内での使用	特定ラジオマイク72ch(イヤーマニター10chを含む)での同時運用
	屋外での使用	特定ラジオマイク30chの同時運用(イヤーマニターを含む)
伝搬距離	特定ラジオマイク100m、イヤーマニター100m	
音声品質	周波数特性	20Hz～20KHz
	ダイナミックレンジ	100dB以上
	遅延時間	1msec程度を希望するユーザーが多い。 (運用実態に合った遅延時間が選択できること)
機能	電池持続時間	8h／単3
	大きさ、重量	現行機種以下

ITU-Rのデジタルワイヤレスマイクの要求条件

デジタルワイヤレスマイクの要求条件 ITU-R BS.2161(11/2009)

Application	Studio	ENG and outside broadcastng	Talk-back	Concerts	Musicals and Plays	In-ear monitor
Content	Voice	Voice	Voice and broadcast programme	Voice and musical instruments	Voice and musical instruments	Voice and musical instruments in stereo
Audio frequency	20Hz-20kHz	20Hz-20kHz (50Hz-10kHz by trade-off with interference)	100Hz-10kHz (100Hz-7kHz by trade-off with interference or latency)	20Hz-over 20kHz	20Hz-over 20kHz	20Hz-15kHz
Audio dynamic range	More than 100 dB (preferably 20-bit linear PCM and more than 120dB)	More than 100 dB	More than 70 dB	More than 100 dB	90 dB	95-100 dB
Maximum sound pressure level of microphone	More than 130 dBSPL	More than 130 dBSPL	-	140 dBSPL	130 dBSPL	-
Maximum acceptable latency	1 ms	5 ms (25 ms by trade-off with interference)	5 ms	2 ms	2 ms	1 ms
Audio interface	AES/EBU output at receiver		AES/EBU input at transmitter	AES/EBU output at receiver		AES/EBU input at transmitter

音声遅延評価結果(1)

特定ラジオマイクのデジタル化にともなって生じる遅延時間について、演奏者がどの程度検知できるか、また許容できるかについて検討をおこなった。実験は以下の3回おこなった。

- (1) 演奏者単独の遅延時間の検知限
- (2) 複数の演奏者がお互いの音を聞き合う場合での遅延時間の検知限(ミュージカル)
- (3) 複数の演奏者がお互いの音を聞き合う場合での遅延時間の検知限(ロックバンド)

(1) 演奏者単独の場合

個人差が大きく、わずか(遅延量0.5ms)でも遅延の有無を検知できる演奏者がいた(全体の約15%)一方で、8~9ms以上でも遅延がわからないという場合もあった。また、遅延量1msを検知できる演奏者は、全体の約1/3であった。全体で見ると、5msの遅延時間で、今回の演奏者の80%が遅延の有無を知覚できていた(図1)。

(2) オーケストラ(ミュージカル)のような楽器編成の大きいアンサンブルの場合

指揮者が最も演奏上の違いを判断でき、4.4msで演奏しにくいと演奏不可能ではないとしていた。既存のデジタルコンソールの遅延も考慮したシステム全体の遅延は、3ms以内であれば問題ないが、5msを超えると演奏上の支障となる可能性がある(図2)。

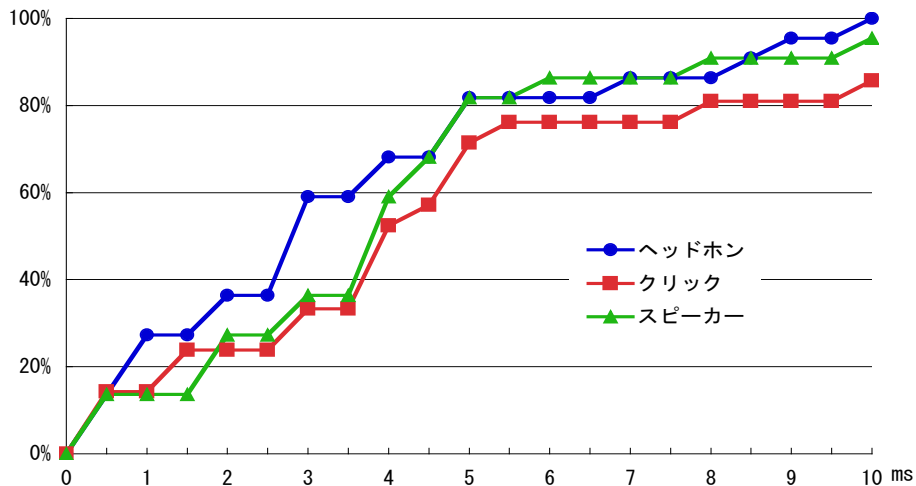


図1. 演奏者単独の遅延時間の検知限

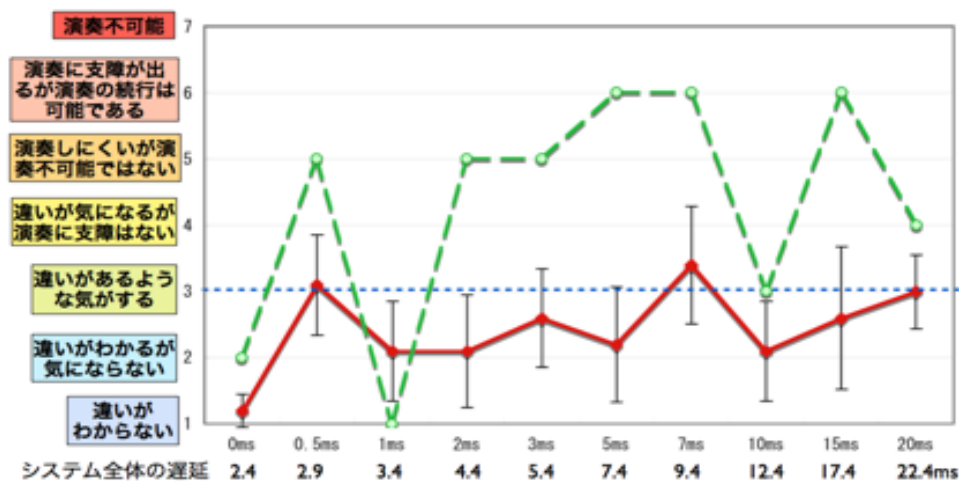


図2. ミュージカルの場合の遅延の検知限
赤は遅延を判断できた演奏者の平均。緑は指揮者の結果。
縦棒は95%信頼区間。

音声遅延評価結果(2)

(3) ロックバンドのスタジオライブ演奏の場合

マイクの遅延時間: 2ms、

ヘッドホンモニターの遅延時間: 3ms

を超えると遅延を検知できる演奏者が多く、演奏上の問題となる可能性があると考えられる。

しかし演奏者によっては、マイクもヘッドホンモニターも、わずかな遅延でも違いに気づく場合もあった。(図3)

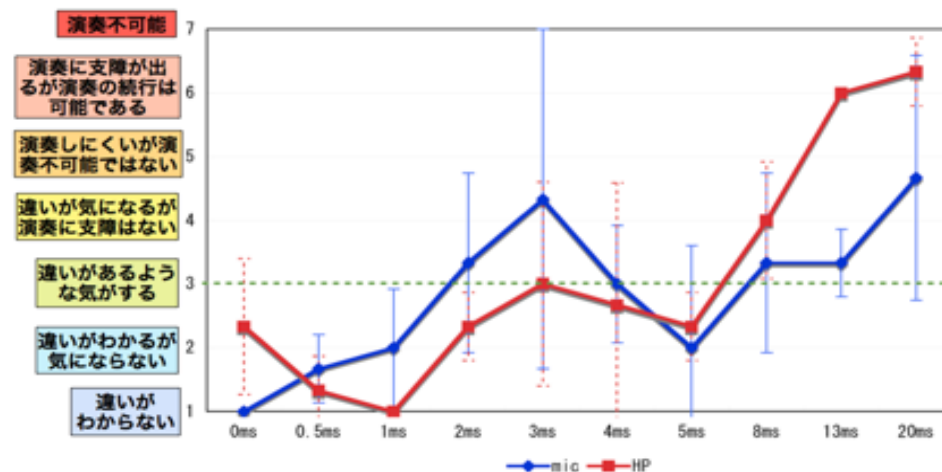


図3. バンド演奏の場合の遅延の検知限
赤はマイクの遅延。青はヘッドホンの遅延。縦棒は95%信頼区間。

まとめ

実験結果を通して、遅延の有無の検知限や検知したときの評価は、個人差が大きい事が改めて確認された。

音声遅延が演奏にどのように影響するかについては、それぞれの条件によって異なってくるため、一概に、何msまでであれば演奏に支障が無いと判断するのは困難であり、なるべく遅延を少なくする事が望まれる。

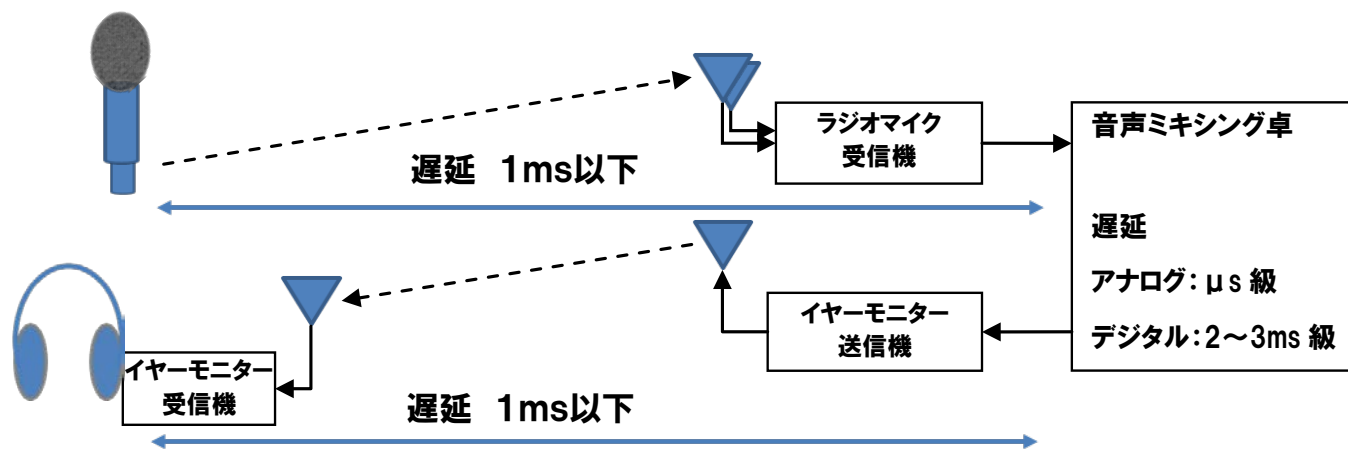
また、演奏者へのインタビューからも遅延の有無は音色の違いとして判断されており、こういった従来の演奏環境と異なる条件が「演奏の質」にどのように影響するかについては、慎重に検討する必要がある。

一方、通常のモニタースピーカーが設置されている距離から生じる遅延や、既にデジタルシステムが導入されている現状を考慮すると、わずかな遅延であれば演奏上問題ないとも言える。しかしそのような既に遅延がある現場においても、遅延量が一定以上になると演奏に影響する可能性はあるため、トータルの遅延時間を考慮してシステムを検討する必要がある。

遅延時間を少なくする方法としては、送信機にマスタークロックを送って同期をとることで、受信機側にサンプリング周波数変換器やADコンバータを介さないシステムの構築も有効であろう。

遅延に対する要求条件のまとめ

- 評価実験の結果、1msの遅延を検知できる演奏者は全体の1/3程度であったことなどを考慮すると、遅延はできるだけ小さいことが要求される。
- ラジオマイクと音声ミキシング卓とイヤーマニターは組み合わせて使用されるので、システム全体の遅延を考慮する必要がある。
 - アナログ方式の音声ミキシング卓の遅延は μs 級である。アナログ方式のイヤーマニターの遅延は μs 級である。従って、遅延が1ms以下の低遅延型デジタルラジオマイクが実現すれば、システム全体の遅延を1ms以下とするシステムを構築できる。
 - 現在のデジタル方式のミキシング卓の遅延は2~3ms級である。遅延が1ms以下の低遅延型デジタルラジオマイクおよびイヤーマニターが実現すれば、システム全体の遅延を5ms以下とするシステムを構築できる。
 - 遅延に対する演奏者の評価は個人差が大きいので、演奏者の要求に応じたシステムを構築する必要がある。柔軟な選択肢が存在することが重要である。



低遅延型デジタル特定ラジオマイクに対する要求条件

項目	デジタルラジオマイク	デジタルイヤーマニター
音声信号の周波数特性	20 Hz ~ 20kHz	20 Hz ~ 15 kHz
音声信号のダイナミックレンジ	100 dB 以上 (120dB 以上が望ましい)	95dB 以上
音声信号の遅延時間	1 ms 以下 (できるだけ小さいことが望ましい)	1ms 以下 (できるだけ小さいことが望ましい)
モノラル／ステレオ	モノラル	ステレオ
伝送距離(最大値)	100 m	100 m
その他	現行方式と同等以下のサイズ、低消費電力 現行方式と同等以上の同時利用本数	現行方式と同等以下のサイズ、低消費電力 現行方式と同等以上の同時利用本数

低遅延型デジタル特定ラジオマイクにおける 無線方式

低遅延型デジタル特定ラジオマイクの伝送方式案

3つの伝送モードを設定

① 標準マイク

非圧縮の高品質音声(リニアPCM)を伝送するモード
情報レートは1152kbps (24bit × 48kHz サンプリング)
伝送に16QAM-OFDMを使用

② 高耐干渉マイク

瞬時圧伸※によるレート削減
雑音・干渉に耐性をもつ伝送モード
伝送にQPSK-OFDMを使用

③ イヤーモニター

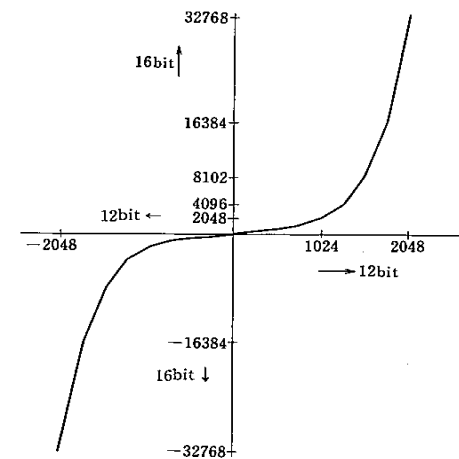
ステレオ伝送が必須、
瞬時圧伸によるレート削減
伝送に16QAM-OFDMを使用

低遅延化に向けた工夫

- ◆AD変換、DA変換の処理にオーバーサンプル技術を導入
- ◆非圧縮音声信号の伝送
- ◆短いOFDMシンボル長
- ◆有効シンボル長を音声サンプル長の整数倍とし、遅延の要因となるバッファメモリを削減
- ◆遅延が小さく訂正能力の高い誤り訂正符号

※瞬時圧伸

人間の聴覚を利用して、ある程度の歪みを許容しながら、情報量を削減する。



伸張特性の例

- 対数特性を近似した曲線を用いて音声の入出力振幅特性をデジタル的に操作し情報を圧縮する。
- アナログラジオマイクに使われているコンパンダと似た手法である。
- 音質に歪みが伴うが、少ない遅延で情報圧縮が実現できる。

低遅延型デジタル特定ラジオマイクの伝送パラメータの検討

モード		①標準マイク	②高耐干渉マイク	③イヤーマニター	
情報源符号化	アナログ音声信号	モノラル	モノラル	ステレオ	
	量子化ビット数	24ビット	24ビット	24ビット, 2系統	
	サンプリング周波数	48 kHz			
	情報圧縮	非圧縮	瞬時圧伸	瞬時圧伸	
	伝送情報ビット数	24ビット	12ビット	12ビット, 2系統	
	情報レート	1152kbps	576kbps	1152kbps	
伝送路符号化	外符号	CRC-2			
	内符号, 符号化率	畳み込み符号, 2/3			
	キャリア変調	16QAM	QPSK	16QAM	
	二次変調	OFDM			
	シンボル長	83.3 μ s			
	有効シンボル長	78.4 μ s			
	ガードインターバル	4.9 μ s (1/16)			
	キャリア間隔	12.75kHz			
	キャリア数	総数	46		
		データ	39		
		SP	3		
		TMCC	3		
		CP	1		
	伝送帯域幅	586.5kHz			
インターリーブ	ビット, 周波数				
受信方法	最大4ブランチ、合成ダイバーシティ受信				

ETSI EN 300 422-1記載の伝送帯域幅

- 欧州のETSI (European Telecommunications Standards Institute) のEN 300 422-1 V1.3.2 には、5 MHz ~ 3 GHz帯までのワイヤレスマイクの特性測定に関する記載がある。
- ワイヤレスマイクの送信周波数が1GHz以下の場合の伝送帯域幅の最大値は200kHzとされ、ワイヤレスマイクの送信周波数が1GHz以上の場合の伝送帯域幅の最大値は600kHzと記載されている。

伝送帯域幅 (ETSI EN 300 422-1 V1.3.2 2008-03)

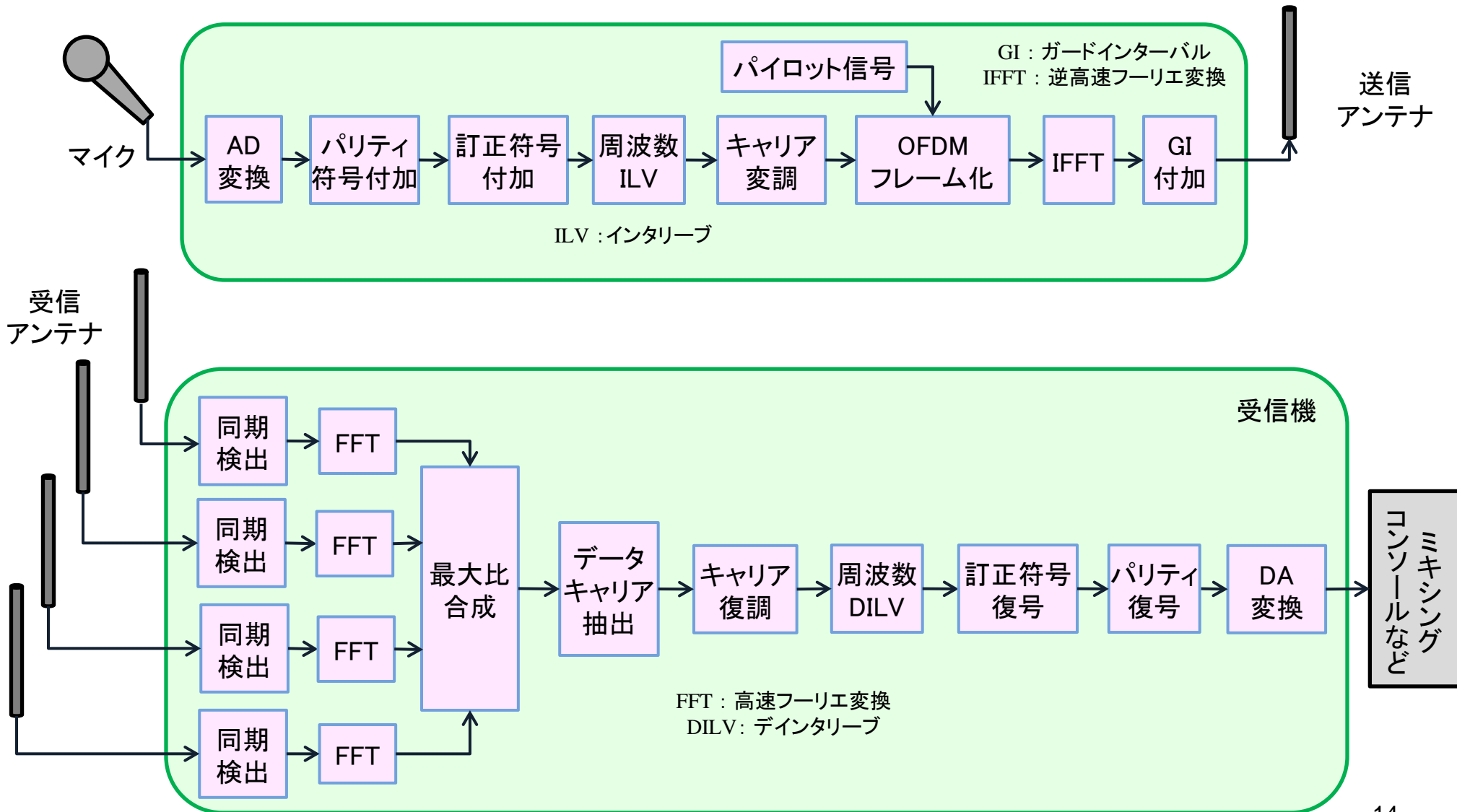
Declared channel Bandwidth (B)	
50 kHz	1 GHzまでは最大 200 kHz
75 kHz	
100 kHz	
150 kHz	
200 kHz	
250 kHz	1 GHz以上は最大600 kHz
300 kHz	
400 kHz	
600 kHz	

低遅延型デジタル特定ラジオマイクの無線方式案

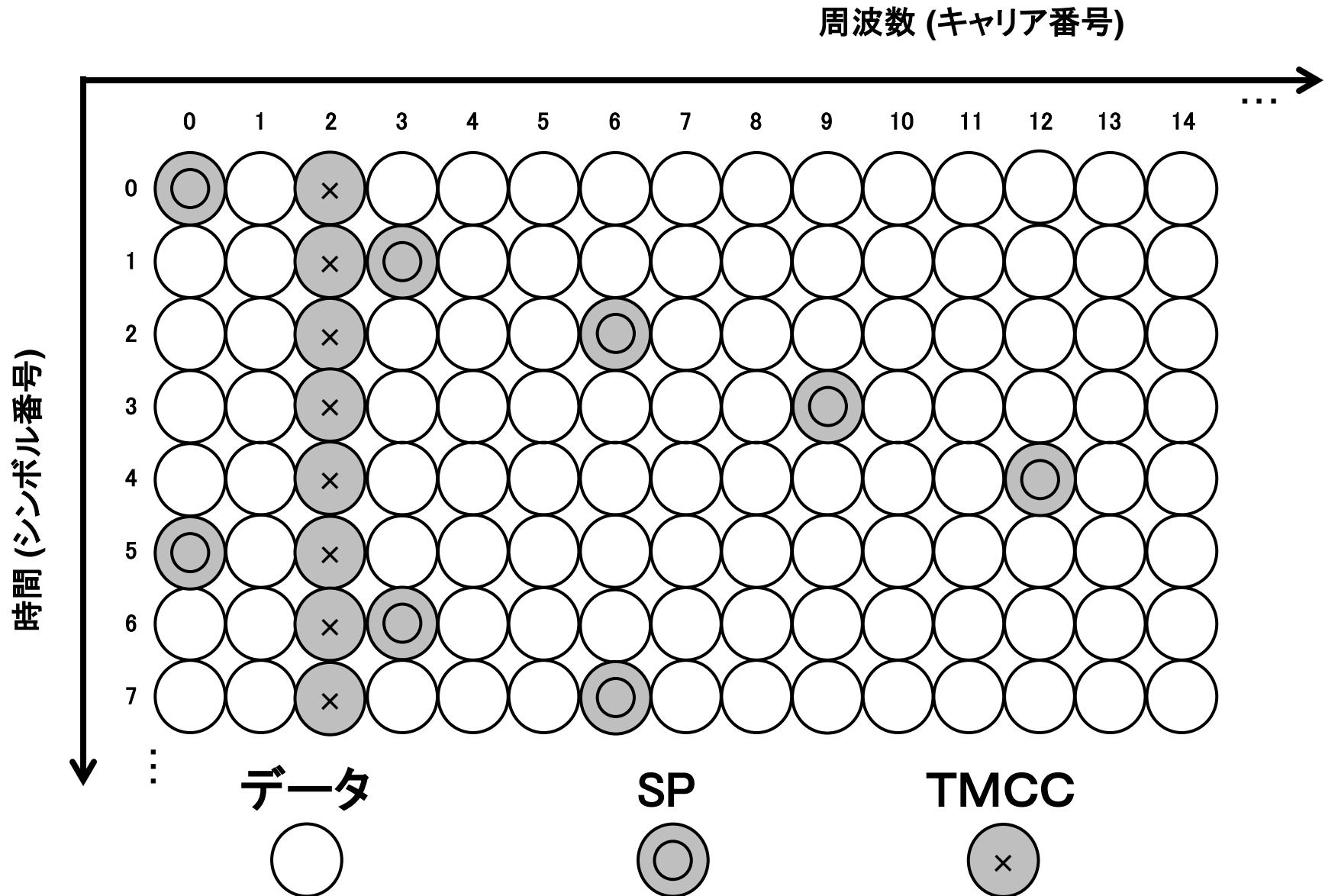
項目	デジタルラジオマイク	デジタルイヤーマニター
通信方式	単方向通信方式及び同報通信方式	単方向通信方式及び同報通信方式
変復調方式	直交周波数分轄多重(OFDM)方式	直交周波数分轄多重(OFDM)方式
キャリア変調方式	16 値直交振幅変調(16QAM)方式 4 相位相変調(QPSK)方式	16 値直交振幅変調(16QAM)方式 4 相位相変調(QPSK)方式
最大情報ビットレート	1152kbps	1152kbps
占有周波数帯域幅(最大値)	600 KHz	600 KHz
使用周波数範囲	1240MHz～1260MHz (1252-1253MHz を除く)	1240MHz～1260MHz (1252-1253MHz を除く)
空中線電力(最大値)	50 mW	50 mW

- ETSI EN 300 422-1 V1.3.2によれば、伝送帯域幅600kHzの送信周波数は1GHz以上としていることなどから、低遅延型デジタル方式特定ラジオマイクの使用周波数範囲は、1240MHz-1260MHz(1252MHz-1253MHzは除く)として検討中

ブロック構成

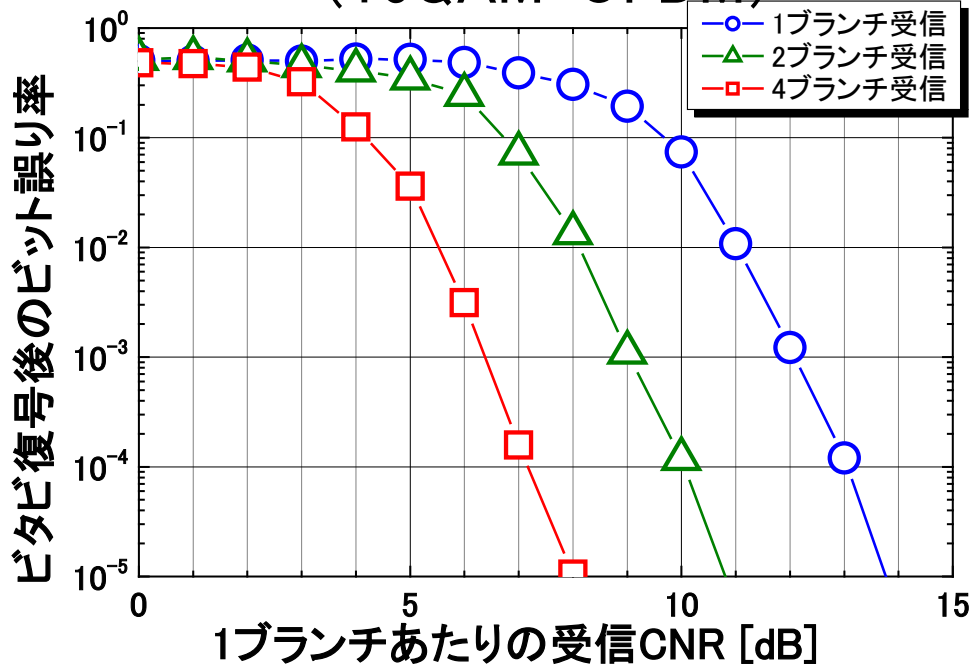


OFDMフレーム構成

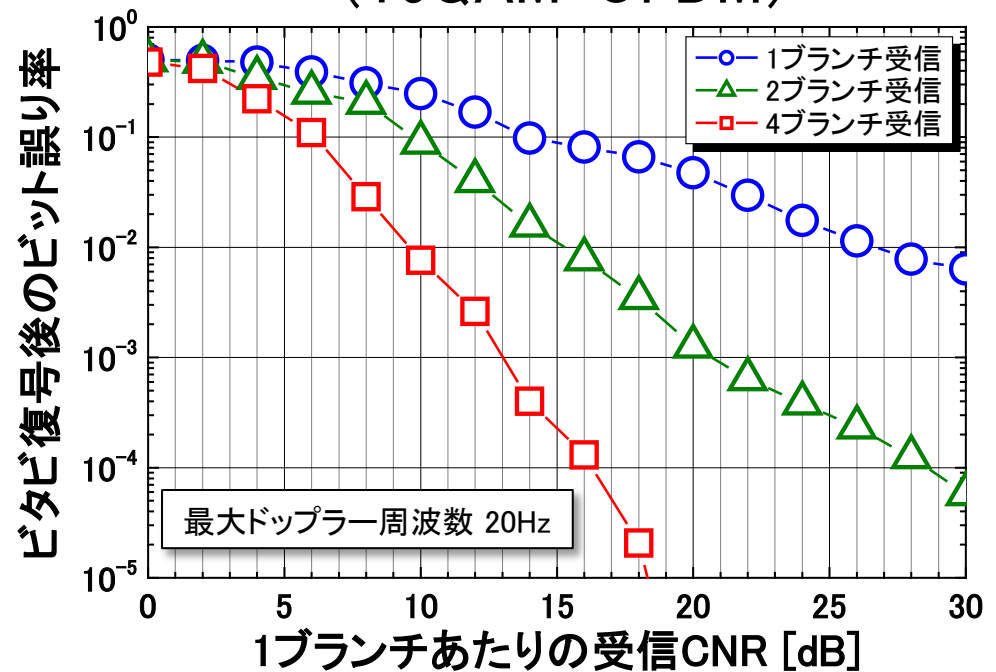


標準マイク、イヤーマニターの伝送特性(シミュレーション)

AWGN特性 (16QAM-OFDM)



レイリーフェージング特性 (16QAM-OFDM)



所要C/N* = 13.8 dB (1ブランチ)
 所要C/N* = 8.0 dB (4ブランチ合成)

所要C/N* 18.4dB (4ブランチ合成)

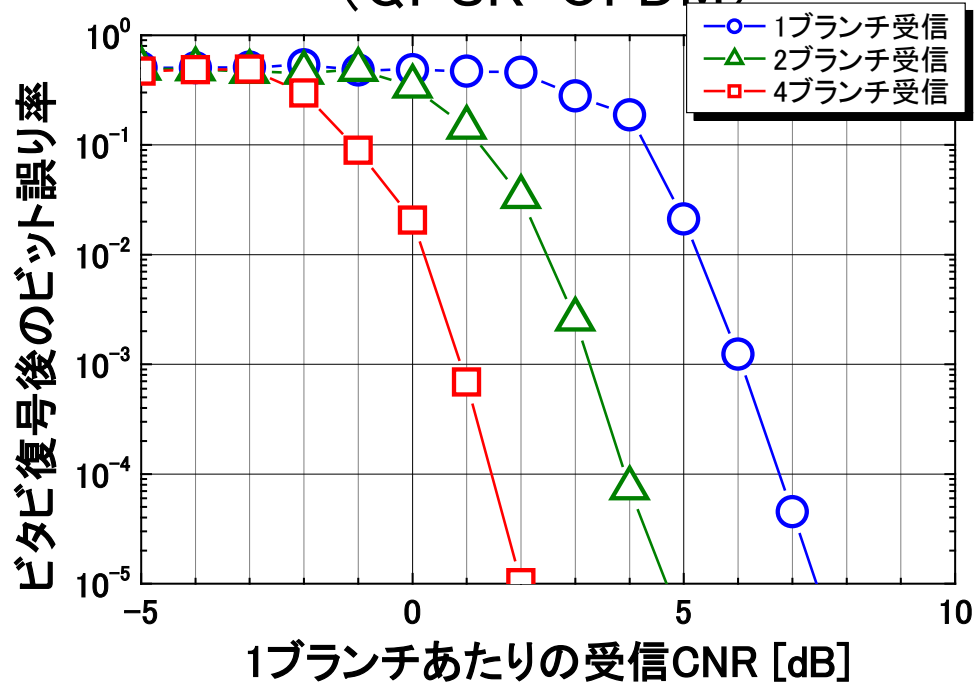
※所要C/N : 誤り訂正後に1 × 10⁻⁵を満たすC/N [dB]

シミュレーションに使用したマルチパス

パス番号	遅延時間[ns]	DUR [dB]
1	0	0
2	100	-7.5
3	200	-15
4	300	-22.5
5	400	-30
6	500	-37.5

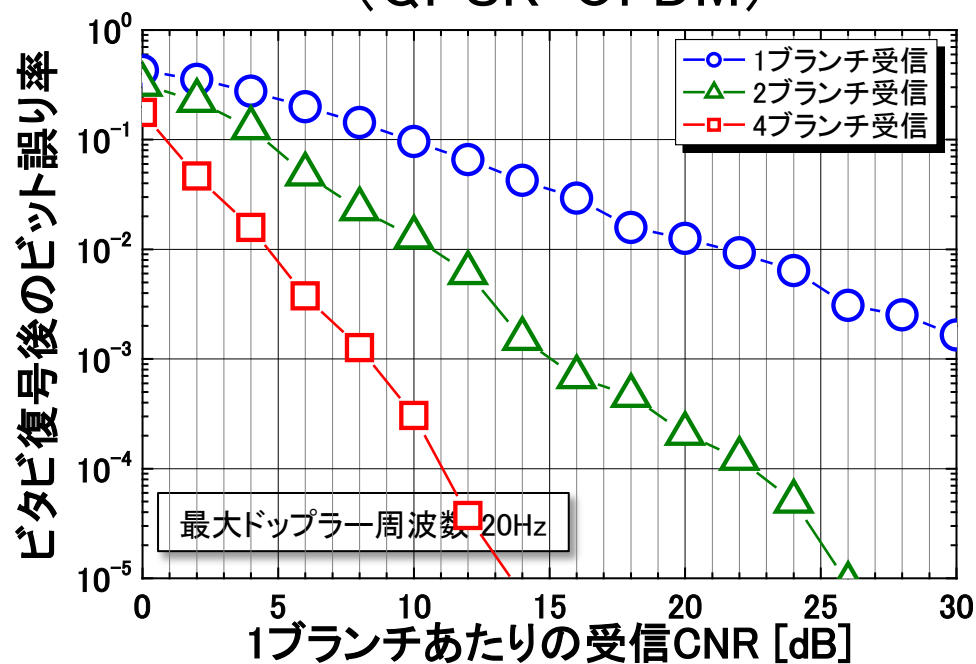
高耐干渉モード伝送特性(シミュレーション)

AWGN特性 (QPSK-OFDM)



所要C/N※ = 7.5 dB (1ブランチ)
 所要C/N※ = 2.0 dB (4ブランチ合成)

レイリーフェージング特性 (QPSK-OFDM)



所要C/N 13.6dB (4ブランチ合成)

シミュレーションに使用したマルチパス

パス番号	遅延時間[ns]	DUR [dB]
1	0	0
2	100	-7.5
3	200	-15
4	300	-22.5
5	400	-30
6	500	-37.5

※所要C/N : 誤り訂正後に 1×10^{-5} を満たすC/N [dB]

伝送実験装置



送信装置



受信装置

遅延時間: 0.8 ms ~ 0.9 ms

伝送性能: シミュレーションとほぼ同等

現在、野外実験検証中

低遅延型デジタル特定ラジオマイクにおける 回線設計

検討中の回線設計(マイク、屋外100m)

表 1 伝送距離 100m 屋外使用 (送信出力 50mW)

	アナログ リニア (ハンド型)	低遅延デジタ ル 16QAM (ハンド型)	アナログ リニア (2 ピース型)	低遅延デジ タル 16QAM (2 ピース型)
送信周波数[MHz]	1250	1250	1250	1250
送信空中線の高さ ht[m]	1.5	1.5	1.5	1.5
受信空中線の高さ ht[m]	1.5	1.5	1.5	1.5
送信出力[dBm]	17	17	17	17
送信アンテナ利得[dBi]	0.85	0.85	0.85	0.85
実効放射電力[dBm]	17.9	17.9	17.9	17.9
伝送距離[m]	100	100	100	100
自由空間伝搬損失[dB]	74.4	74.4	74.4	74.4
人体によるアンテナ利得損[dB]	11	11	21	21
受信アンテナ利得[dBi]	2.14	2.14	2.14	2.14
自由空間受信電力[dBm]	-54.4	-54.4	-54.4	-54.4
受信電力[dBm]	-65.4	-65.4	-75.4	-75.4
ボルツマン定数[dBm/(Hz・K)]	-198.6	-198.6	-198.6	-198.6
標準温度[dBK]	25	25	25	25
信号帯域幅[kHz]	330	600	330	600
信号帯域幅[dBHz]	55.2	58	55.2	58
受信機雑音指数[dB]	6	6	6	6
受信機の固定劣化[dB]	4	4	4	4
受信機熱雑音[dBm]	-112.4	-109.8	-112.4	-109.8
所要 S/N[dB]	60	-	60	-
ベースバンド帯域幅[kHz]	15	-	15	-
周波数偏移[kHz]	150	-	150	-
FM改善度[dB]	24.8	-	24.8	-
エンファシス時定数[μs]	50	-	50	-
FM エンファシス改善度[dB]	10.2	-	10.2	-
フェージングマージン(2 受信)	23.5	23.5	23.5	23.5
フェージングマージン(4 受信)	8.9	8.9	8.9	8.9
所要 C/N[dB]	25.1	13.8	25.1	13.8
受信 C/N[dB]	43.0	40.4	33.0	30.4
マージン[dB] (2 受信ダイバー)	-5.5	3.1	-15.5	-6.9
マージン[dB] (4 受信ダイバー)	-	17.7	-	7.7

送信周波数: 1250MHz
 伝送距離: 100m
 送信出力: 50mW

※人体によるアンテナ利得損について

アンテナ指向性の検討および伝搬試験の結果を受けて、従来から800MHz帯で用いていた値に対して、800MHzと1.2GHzの差として3dBを加算

ハンド型: $8\text{dB} + 3\text{dB} = 11\text{dB}$
 2ピース型: $18\text{dB} + 3\text{dB} = 21\text{dB}$

検討中の回線設計(マイク、屋内60m)

表2 伝送距離 60m 屋内使用 (送信出力 10mW)

	アナログ リニア (ハンド型)	低遅延デジ タル 16QAM (ハンド型)	アナログ リニア (2ピース型)	低遅延デジタ ル 16QAM (2ピース型)
送信周波数[MHz]	1250	1250	1250	1250
送信空中線の高さ ht[m]	1.5	1.5	1.5	1.5
受信空中線の高さ ht[m]	1.5	1.5	1.5	1.5
送信出力[dBm]	10	10	10	10
送信アンテナ利得[dBi]	0.85	0.85	0.85	0.85
実効放射電力[dBm]	10.9	10.9	10.9	10.9
伝送距離[m]	60	60	60	60
自由空間伝搬損失[dB]	69.9	69.9	69.9	69.9
人体によるアンテナ利得損[dB]	11	11	21	21
受信アンテナ利得[dBi]	2.14	2.14	2.14	2.14
自由空間受信電力[dBm]	-57.0	-57.0	-57.0	-57.0
受信電力[dBm]	-68.0	-68.0	-78.0	-78.0
ボルツマン定数[dBm/(Hz・K)]	-198.6	-198.6	-198.6	-198.6
標準温度[dBK]	25	25	25	25
信号帯域幅[kHz]	330	600	330	600
信号帯域幅[dBHz]	55.2	58	55.2	58
受信機雑音指数[dB]	6	6	6	6
受信機の固定劣化[dB]	4	4	4	4
受信機熱雑音[dBm]	-112.4	-109.8	-112.4	-109.8
所要 S/N[dB]	60	-	60	-
ベースバンド帯域幅[kHz]	15	-	15	-
周波数偏移[kHz]	150	-	150	-
FM改善度[dB]	24.8	-	24.8	-
エンファシス時定数[μs]	50	-	50	-
FM エンファシス改善度[dB]	10.2	-	10.2	-
フェージングマージン(2 受信)	23.5	23.5	23.5	23.5
フェージングマージン(4 受信)	8.9	8.9	8.9	8.9
所要 C/N[dB]	25.1	13.8	25.1	13.8
受信 C/N[dB]	40.5	37.9	30.5	27.9
マージン[dB] (2 受信ダイバー)	-8.1	0.6	-18.1	-9.4
マージン[dB] (4 受信ダイバー)	-	15.2	-	5.2

送信周波数: 1250 MHz
 伝送距離: 60 m
 送信出力: 10 mW

※人体によるアンテナ利得損について

アンテナ指向性の検討および伝搬試験の結果を受けて、従来から800MHz帯で用いていた値に対して、800MHzと1.2GHzの差として3dBを加算

ハンド型: 8dB + 3dB = 11dB
 2ピース型: 18dB + 3dB = 21dB

検討中の回線設計(イヤーマニター)

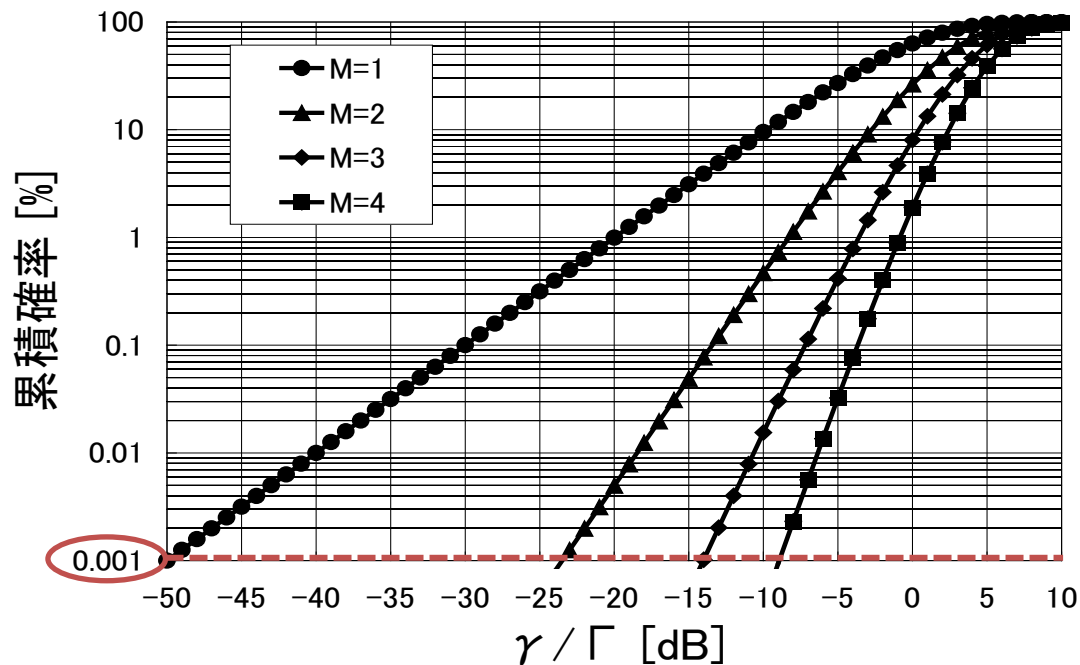
表3 低遅延型デジタル特定ラジオマイクイヤーマニター

	低遅延 デジタル イヤーマニター	低遅延 デジタル イヤーマニター
送信周波数[MHz]	1250	1250
送信空中線の高さ ht[m]	4.0	4.0
受信空中線の高さ ht[m]	1.5	1.5
送信出力[dBm]	17	17
送信アンテナ利得[dBi]	2.14	7.00
実効放射電力[dBm]	19.1	24.0
伝送距離[m]	60	100
自由空間伝搬損失[dB]	69.9	74.4
人体によるアンテナ利得損[dB]	21	21
受信アンテナ利得[dBi]	0.85	0.85
自由空間受信電力[dBm]	-50.0	-49.5
受信電力[dBm]	-71	-70.5
ボルツマン定数[dBm/(Hz·K)]	-198.6	-198.6
標準温度[dBK]	25	25
信号帯域幅[kHz]	600	600
信号帯域幅[dBHz]	58	58
受信機雑音指数[dB]	6	6
受信機の固定劣化[dB]	4	4
受信機熱雑音[dBm]	-109.8	-109.8
フェージングマージン(2 受信)	18.5	18.5
所要 C/N[dB]	13.8	13.8
受信 C/N[dB]	34.9	35.3
マージン[dB] (2 受信ダイバー)	2.6	3.0

送信周波数: 1250 MHz
 伝送距離: 60m、100m
 送信アンテナ利得: 2.14dBi、7dBi
 送信出力: 50 mW

フェージングマージンの考え方

$$F(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \sum_{m=1}^M \frac{(\gamma/\Gamma)^{m-1}}{(m-1)!}$$



2ブランチ
23.5dB

4ブランチ
8.9dB

レイリーフェージング環境において最大比合成を用いることを想定

“「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件」のうち「特定ラジオマイクの高度化に向けた技術的条件」,” 情報通信審議会 諮問第2009号, Jan. 2007.

低遅延型デジタル特定ラジオマイクにおける 電波防護指針への適合

電波防護指針への適合

【電気通信技術審議会答申 諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方」
(平成9年4月)より抜粋】

(参考)電波防護指針を満たすと考えられる携帯型の無線局
一般環境(条件G)においては、空中線電力が平均電力で20mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、局所SARの電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。
また、管理環境(条件P)においては、空中線電力が100mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。
(根拠)

2W/kg(条件G)の指針値を10g当たりの電力で考えると20mW、
10w/kg(条件P)の指針値を10g当たりの電力で考えると100mW。

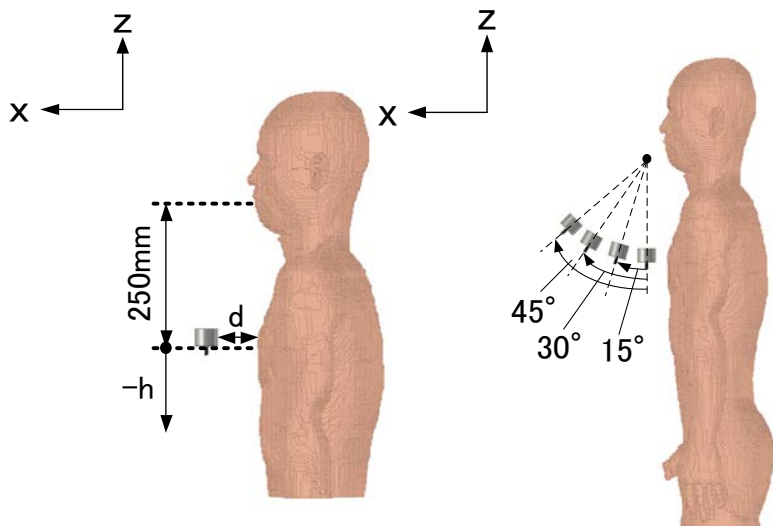
特定ラジオマイク(アナログ方式及びデジタル方式)は、無線局免許を必要とする無線局である。したがって管理環境(条件P)下での使用であるとみなすことができる。
そのため空中線電力が100mW以下であれば上記の条件に合致するため、影響がないものと考えられる。

参考資料8にハンド型ラジオマイクの運用を考慮したSARの解析結果を示す。これによれば、運用上想定される設置条件で送信出力が50mWの場合、10g平均局所SARは最大でも0.2[W/kg]を下回る値(距離2cm)となっている。一般環境の局所SARは任意の組織10g当たり2W/kgであり、体に装着して運用する2ピース型のラジオマイクにおいても影響がないものと考えられる。

ハンド型ラジオマイクのSARの解析

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad [W/kg]$$

σ は生体組織の導電率[S/m],
 ρ は生体組織の密度[kg/m³],
 E は電界強度の実効値[V/m]



(a) 距離と高さ

(b) 角度

図1 アンテナの設置位置とパラメータ

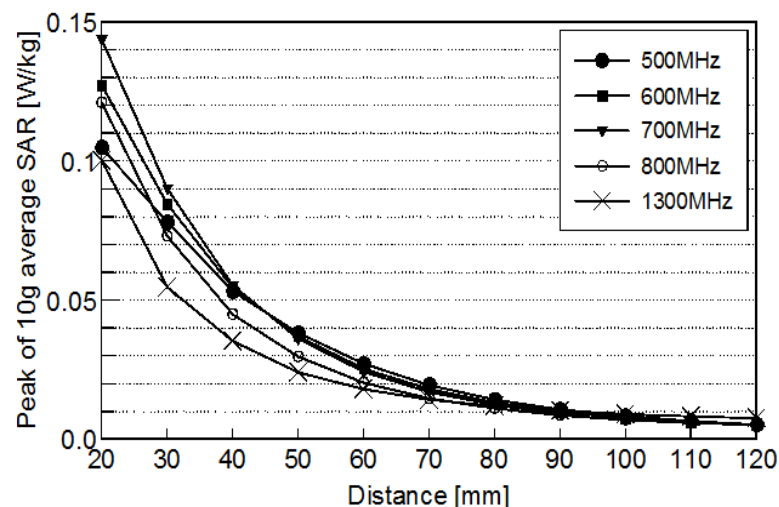


図2 距離の違いによるSARの解析結果

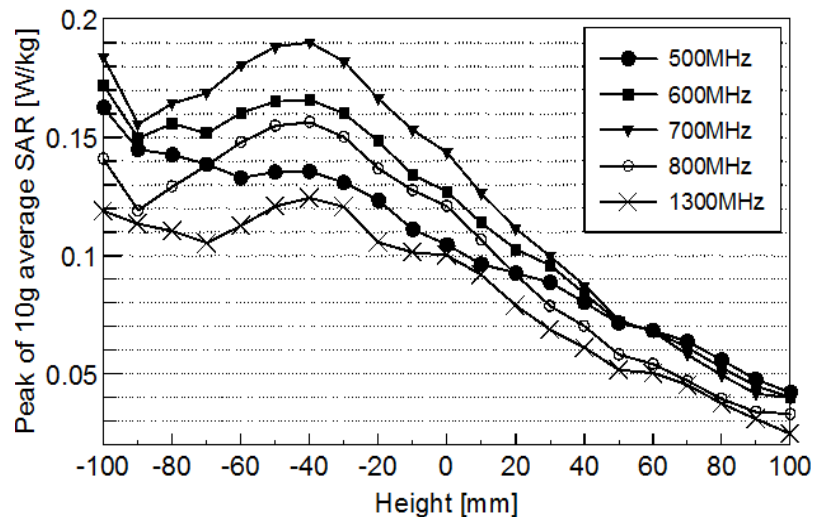


図3 高さの違いによるSARの解析結果

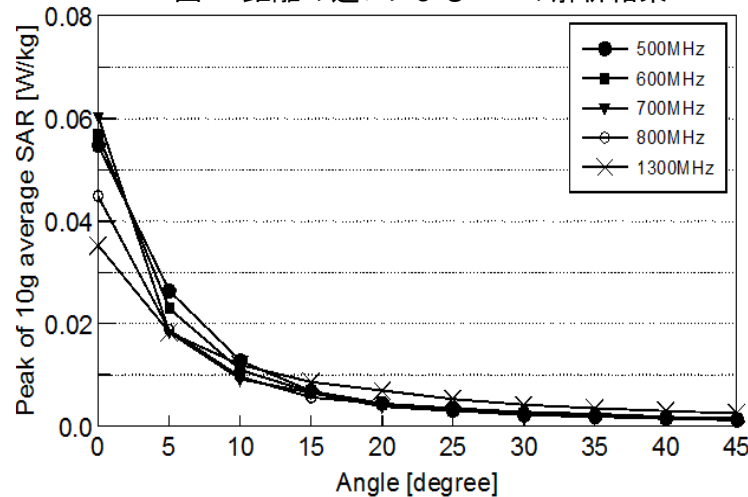


図4 角度の違いによるSARの解析結果