

ICTイノベーションフォーラム2012
セッションA4「ワイヤレス・ネットワーク基盤技術」
A4-1 2012年10月2日 15:30 – 15:55

測位及び双方向無線通信システムの高速化 ・省電力化技術の研究開発

Research and Development of New Wireless System Technology
for Positioning and High-Speed Two-Way Communications
with Low Power Consumption

研究代表者

澤谷 邦男† 東北大学大学院工学研究科

研究分担者

北吉 均‡ 東北大学大学院工学研究科

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05

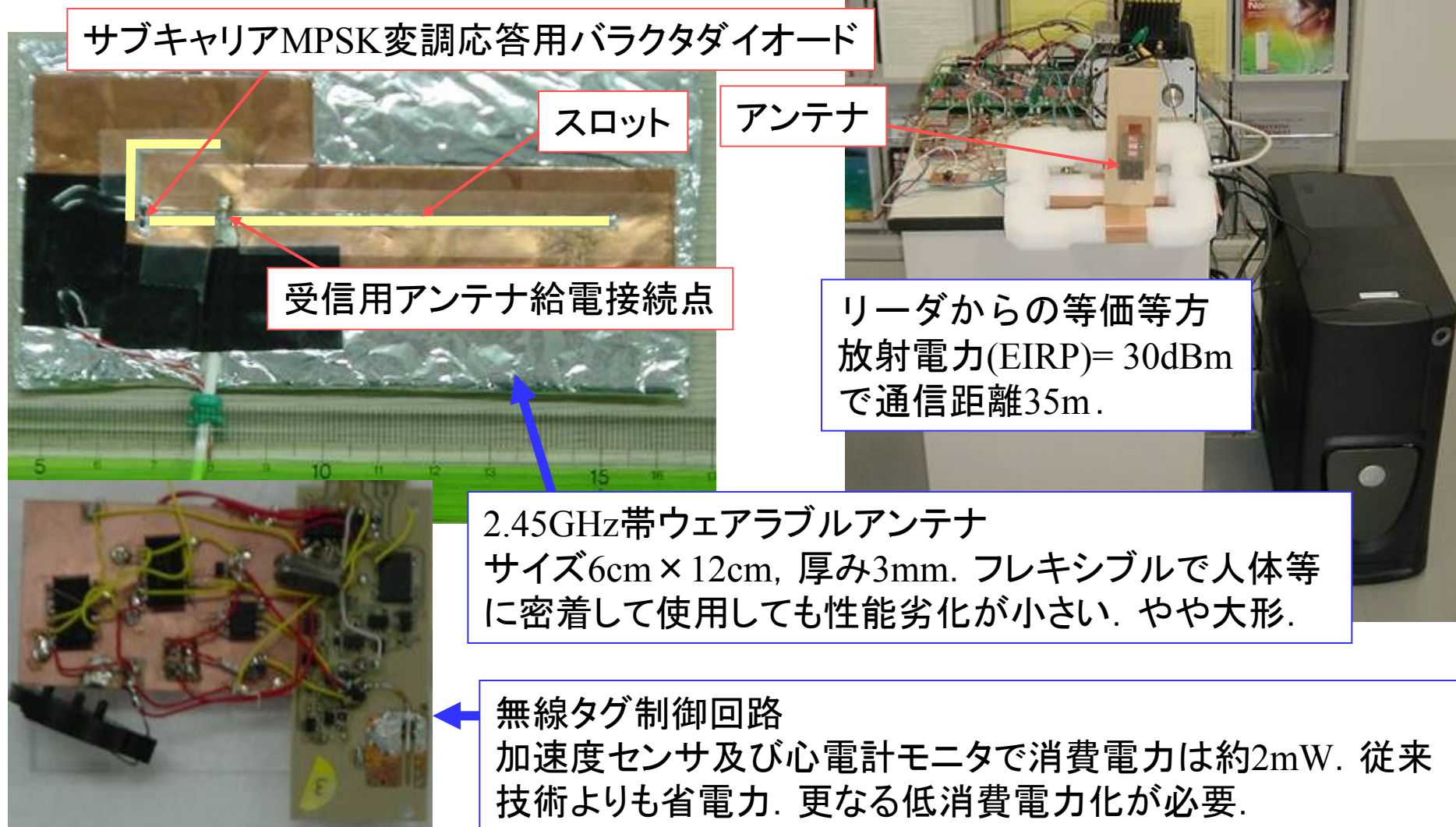
E-mail: †sawaya@ecei.tohoku.ac.jp, ‡kitayoshi@ecei.tohoku.ac.jp

発表内容

1. SCOPE以前の取り組みと研究課題
2. 無線タグ端末の低消費電力化と通信距離の拡大
 - 2.1. タグ側受信レベルと応答利得の改善
 - 2.2. アンテナ小形化とスタブ共振昇圧ASK 受信復調方式
 - 2.3. パルス符号化鍵検出方式
 - 2.4. 無線タグ端末の構成
 - 2.5. リーダ・タグ間の通信プロトコル
3. 無線タグリーダの構成と信号処理
 - 3.1. 無線タグリーダの構成とタグ応答受信信号
 - 3.2. リーダ・タグ間距離及び相対速度計測
4. センサネットワークの実験評価
 - 4.1. センサネットワークの構成
 - 4.2. 無線タグ端末のポジショニング
 - 4.3. データ通信
5. まとめ

1. SCOPE以前の取り組みと研究課題

2.45GHz帯の無線タグシステム



1. SCOPE以前の取り組みと研究課題

5GHz帯の無線タグシステム

リーダ装置

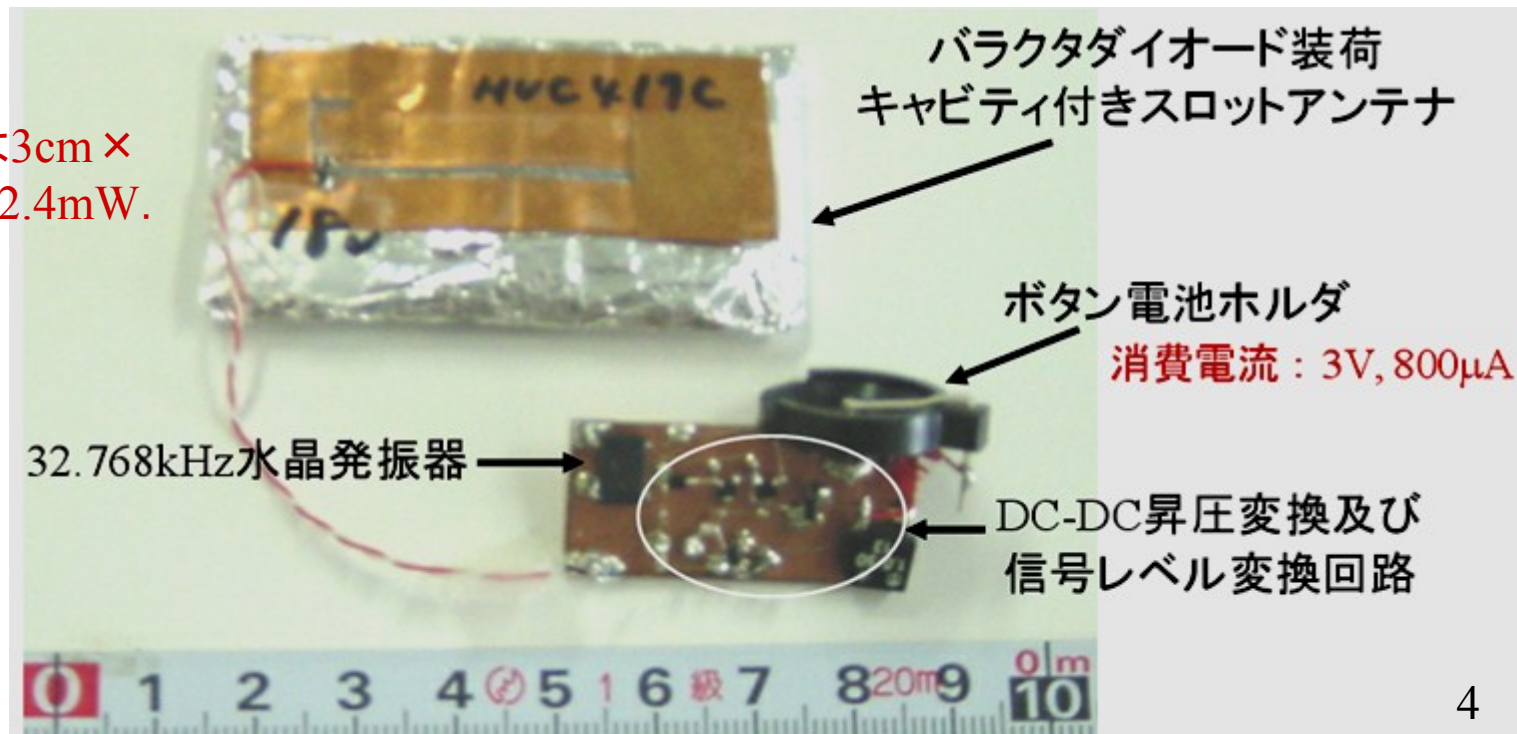


EIRP=25dBm

リーダ・タグ間往復の伝搬損
は、2.45GHz帯の約16倍.

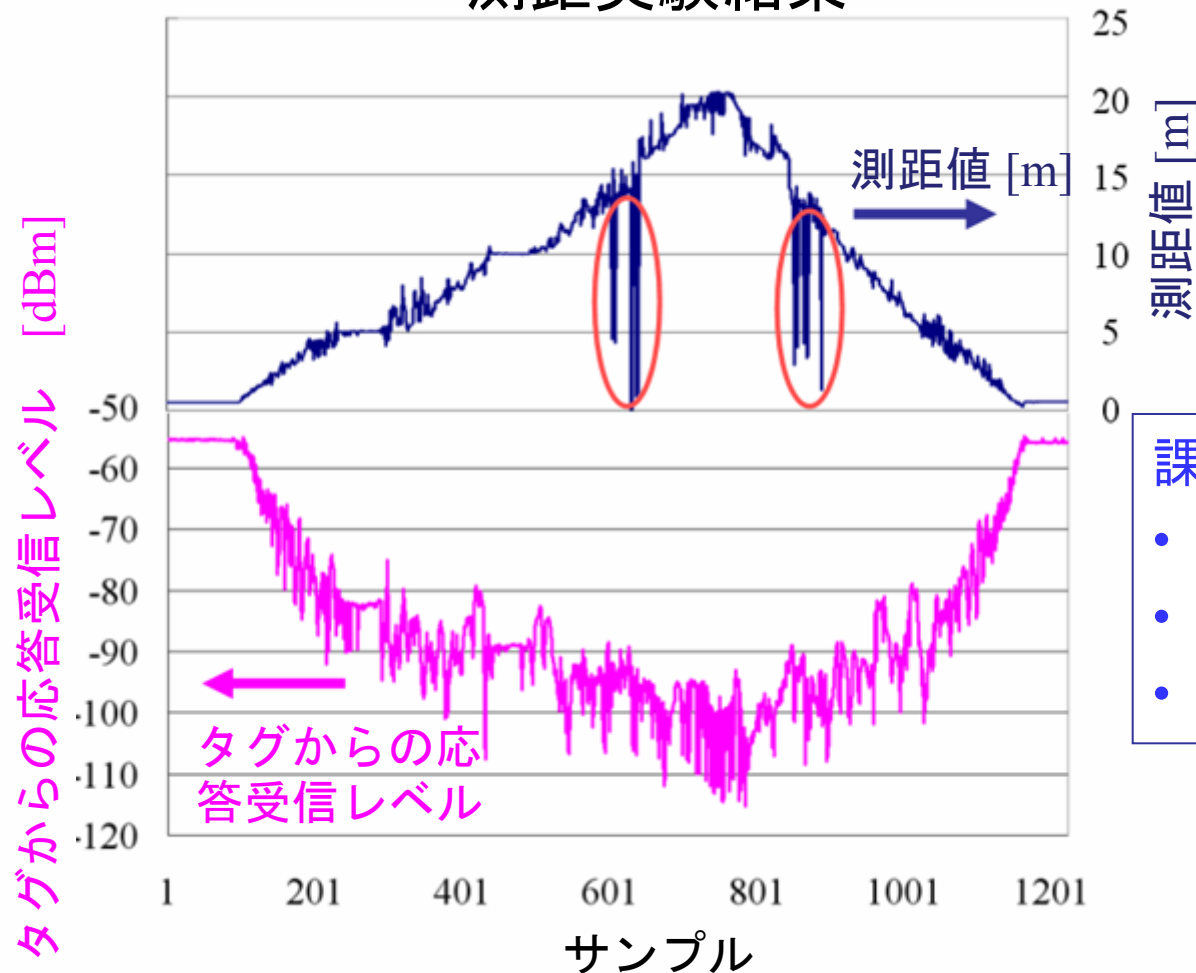
測距用無線タグ

アンテナサイズは3cm×
6cmで消費電力は2.4mW.



1. SCOPE以前の取り組みと研究課題

5GHz帯の無線タグシステム 測距実験結果



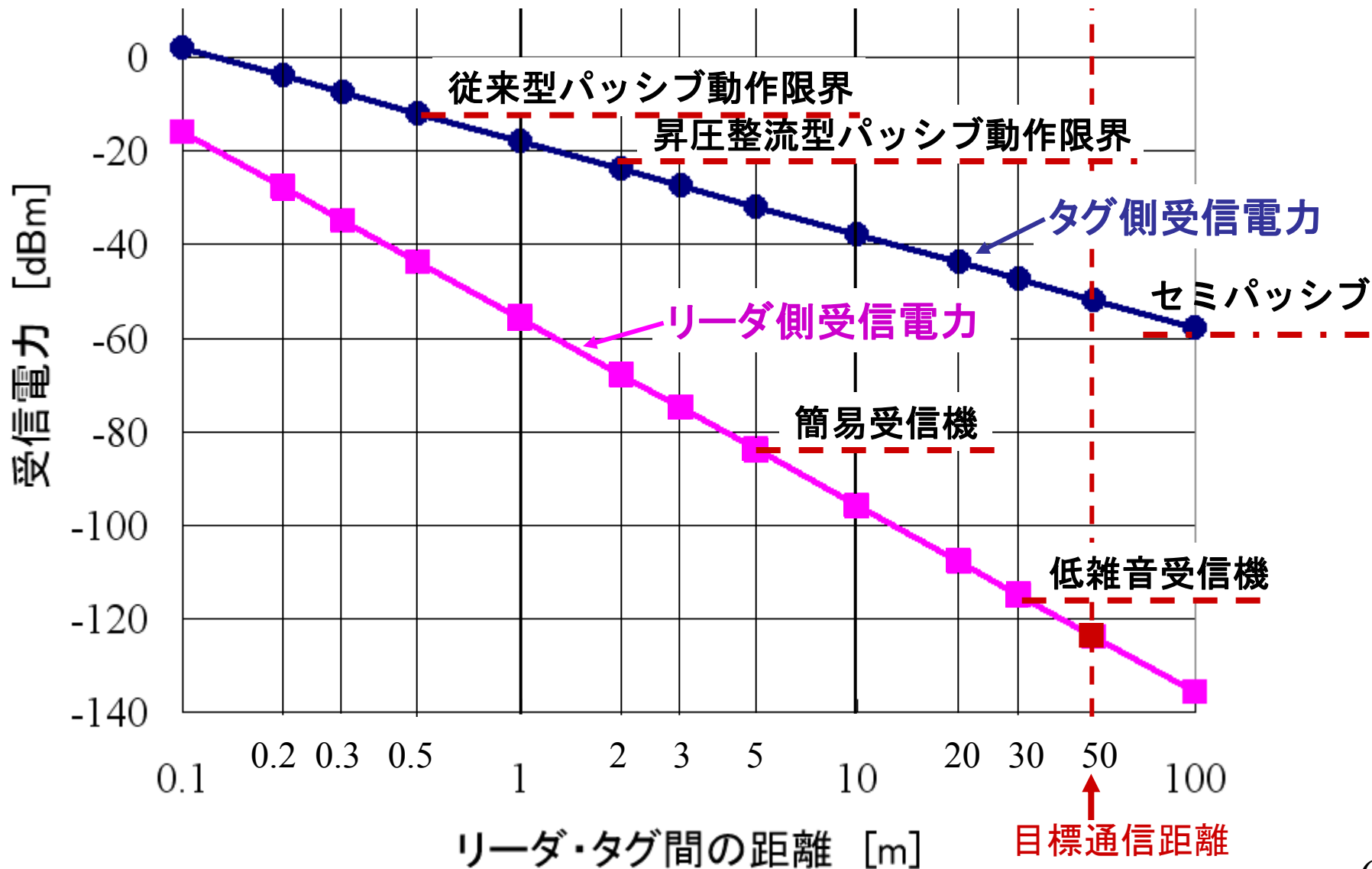
課題

- 通信距離の拡大
- 測距精度の向上
- タグの低消費電力化

2.1. タグ側受信レベルと応答利得の改善

リーダ側：送信電力20dBm, 周波数5.3GHz, アンテナ動作利得4.5dBi

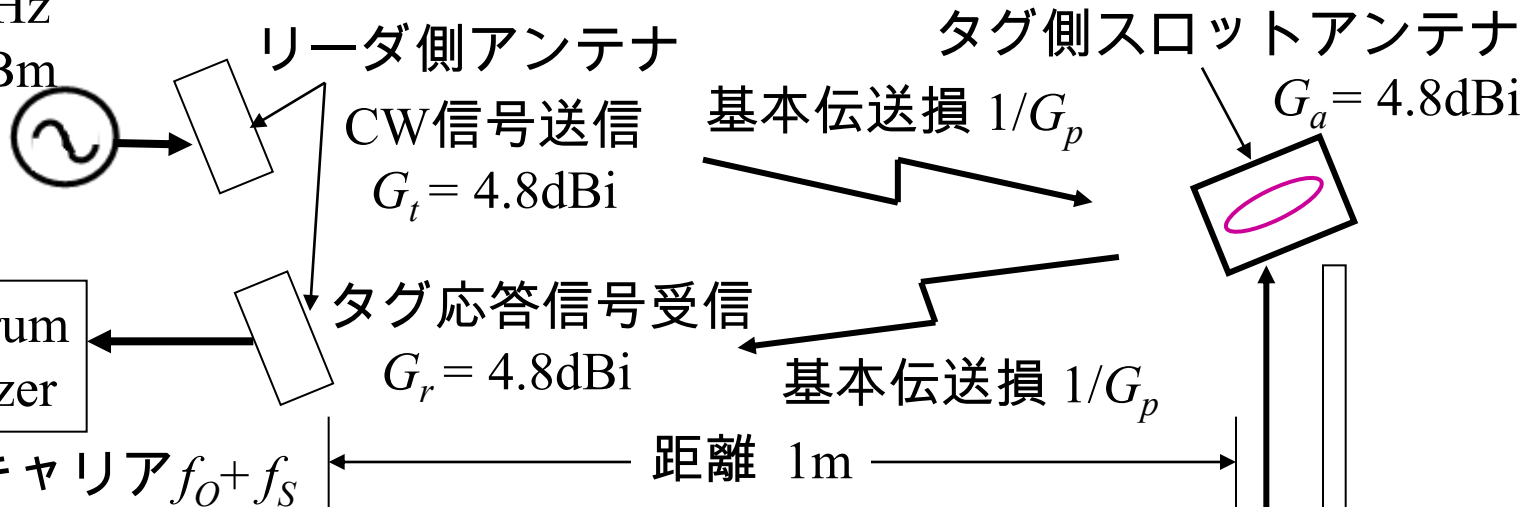
タグ側：変調反射効率100%, アンテナ動作利得4.5dBi



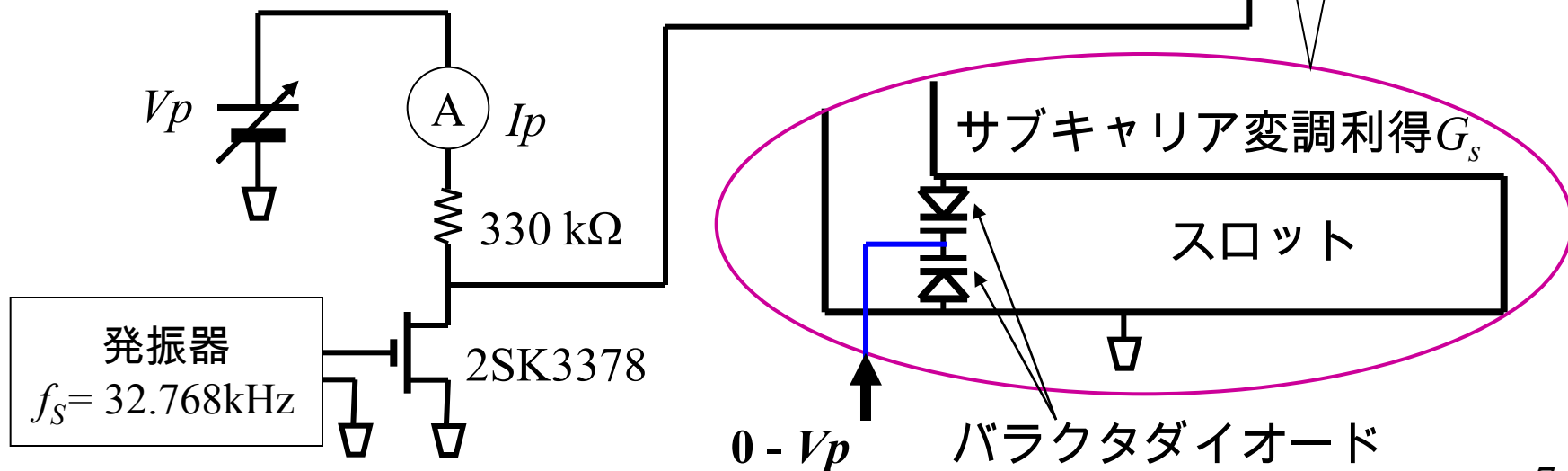
2.1. タグ側受信レベルと応答利得の改善

リーダ・タグ間通信モデルとタグ応答受信電力の評価実験系

$$f_0 = 5.3 \text{ GHz}$$
$$P_t = 20 \text{ dBm}$$

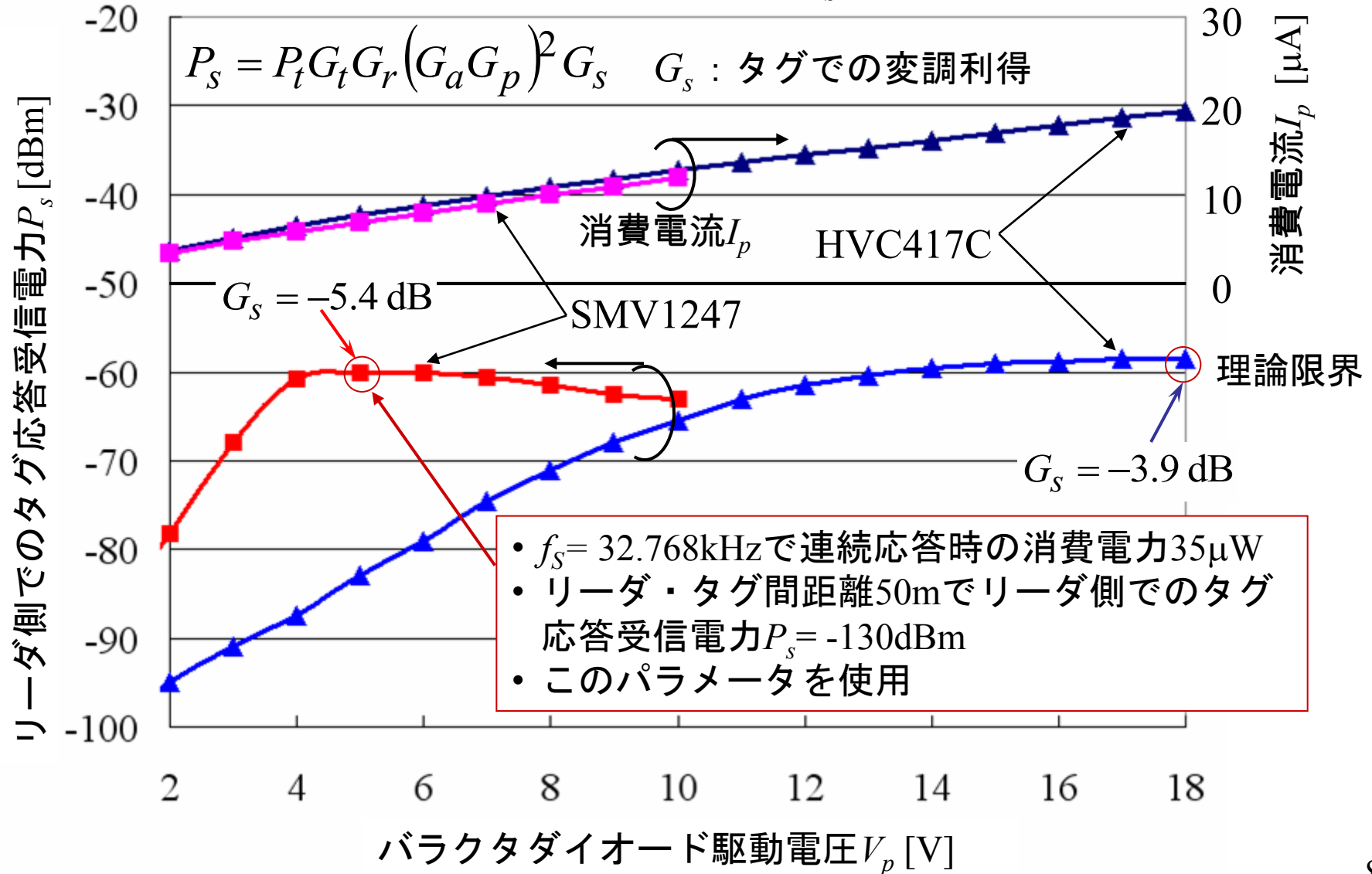


応答サブキャリア $f_0 + f_s$
の受信レベル P_s を観測



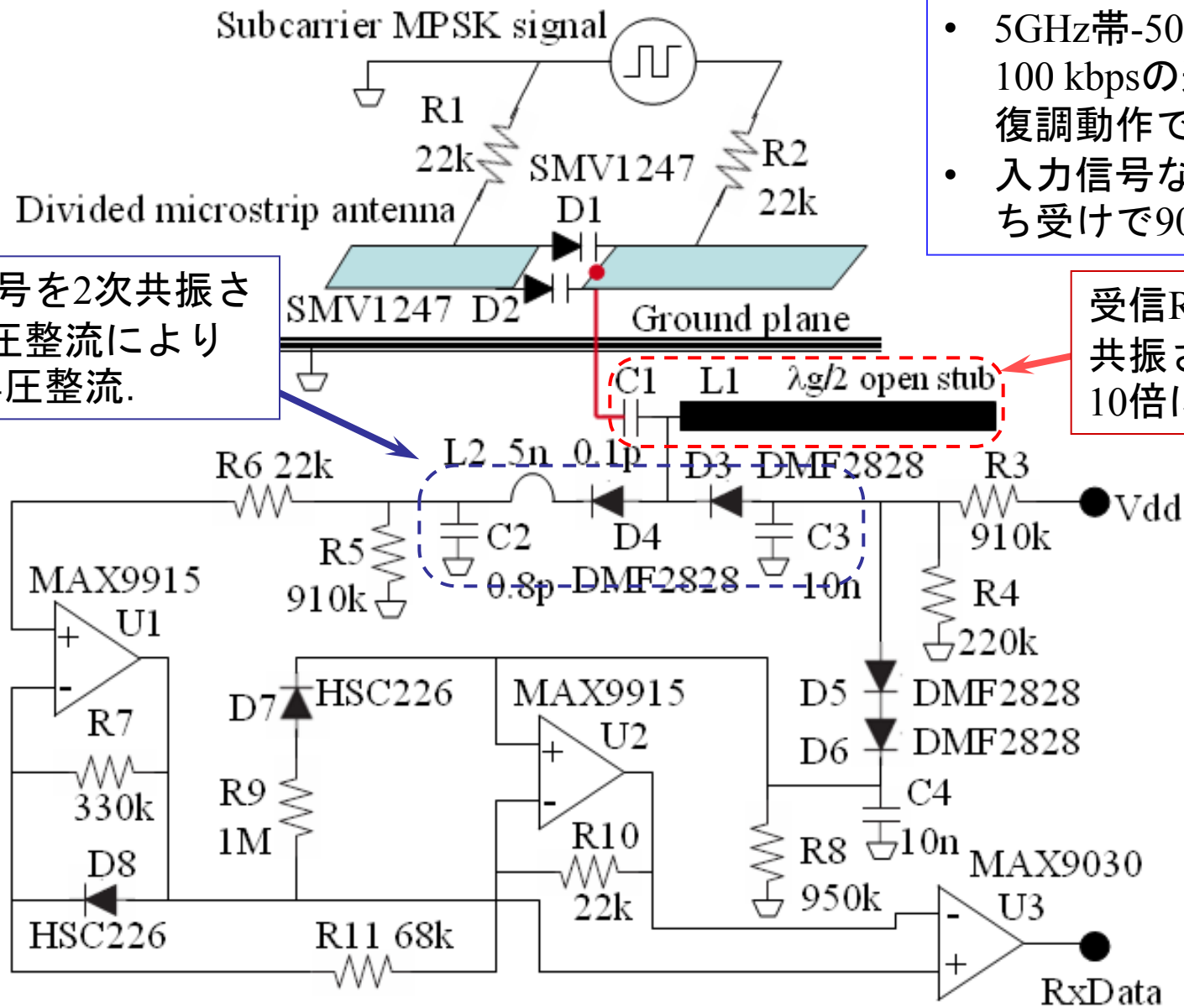
2.1. タグ側受信レベルと応答利得の改善

タグ側バラクタダイオード駆動電圧 V_p に対する消費電流 I_p 及びリーダ側でのタグ応答受信電力 P_s の実験値



2.2. アンテナ小形化とスタブ共振昇圧ASK 受信復調方式

5GHz帯高感度・低消費電力ASK受信復調回路



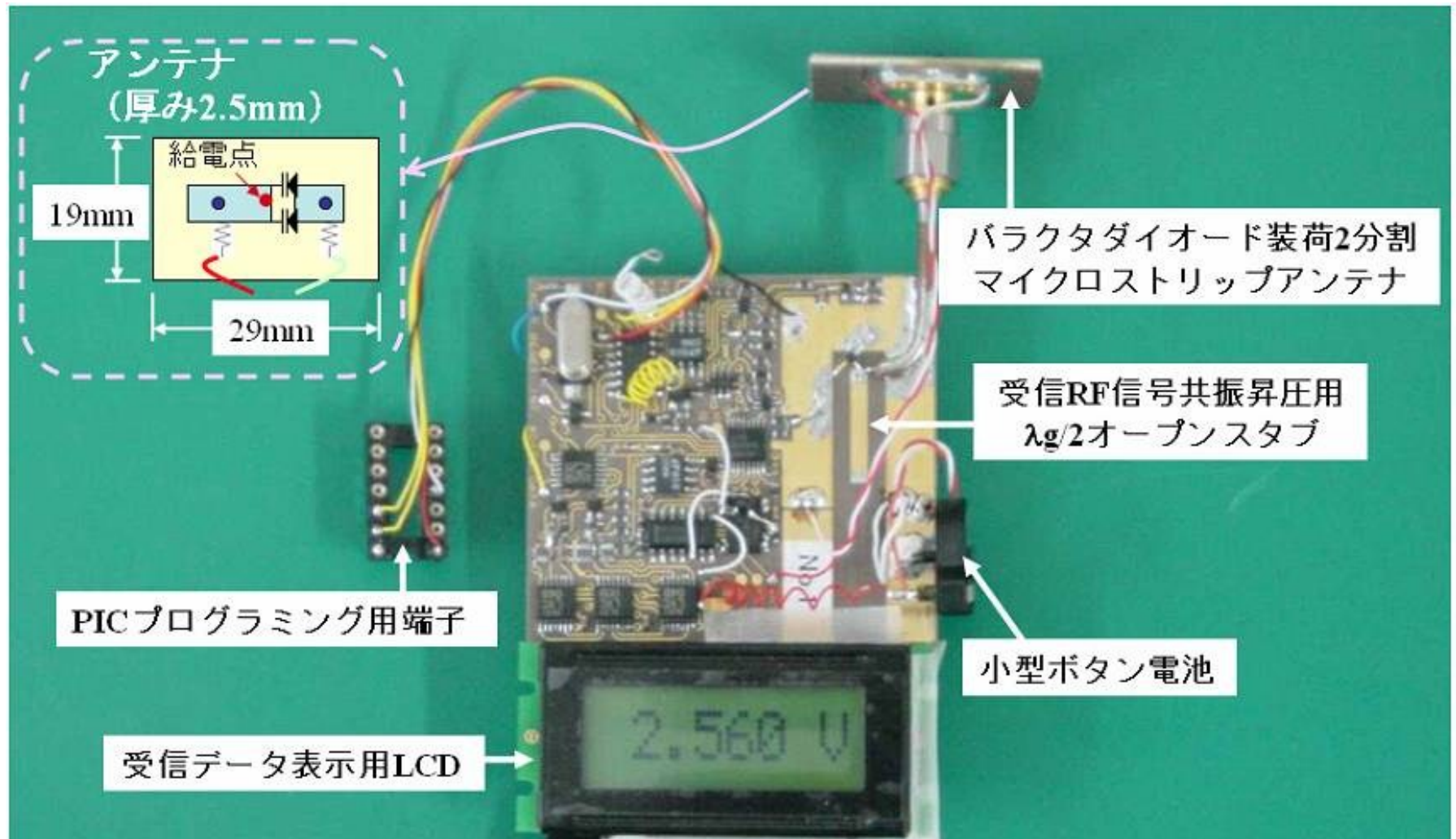
受信回路の消費電力：

- 5GHz帯-50dBm入力, 100 kbpsの連続受信復調動作で110 μ W.
- 入力信号なし連続待ち受けて90 μ W.

2.2. アンテナ小形化とスタブ共振昇圧ASK 受信復調方式

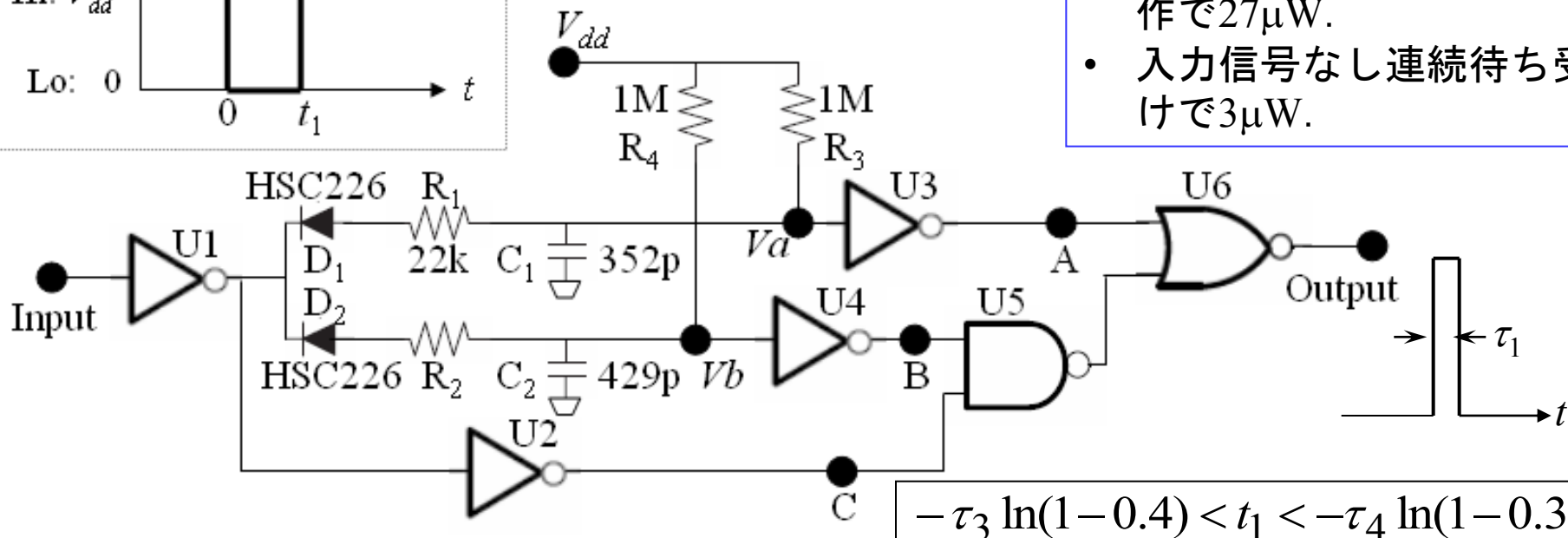
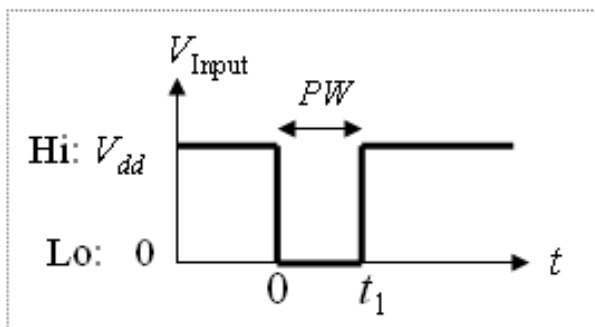
5GHz帯受信応答共用アンテナと回路基板

アンテナ特性：・動作利得 $G_a=5\text{dBi}$ ，・面積 $A=5.5\text{cm}^2$ （5GHz帯応答専用スロットアンテナの約1/3）・変調利得 $G_s=-13\text{dB}$ ．



2.3. パルス符号化鍵検出方式

一定パルス幅の信号を検出する回路



消費電力：

- ・ 繰り返し50kHzの連続動作で27 μ W.
- ・ 入力信号なし連続待ち受けで3 μ W.

$-\tau_3 \ln(1-0.4) < t_1 < -\tau_4 \ln(1-0.36)$
を満たすとき A=Lo, B=Hi, C=Hi
 $\Rightarrow$ OutputがHiレベル

$R_1 \ll R_3$, $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_3 = R_3 C_1$ とし, かつ $R_2 \ll R_4$, $\tau_2 = R_2 C_2$, $\tau_4 = R_4 C_2$ とする.

ここで, $\tau_3 < \tau_4$, $\tau_1 < \tau_2$ として, パルス幅検出下限値は, $t_1 = -\tau_3 \ln(1-0.4)$

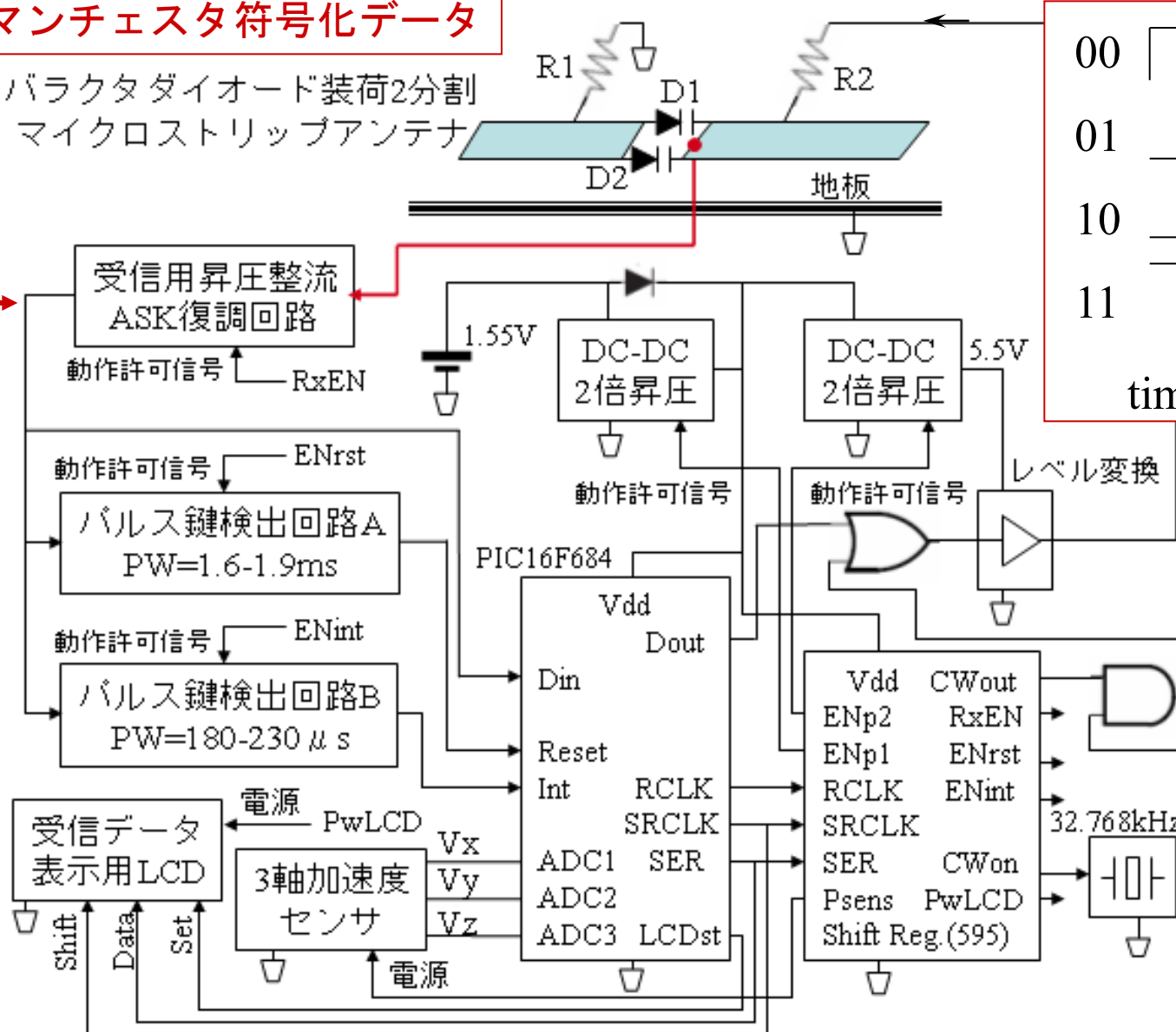
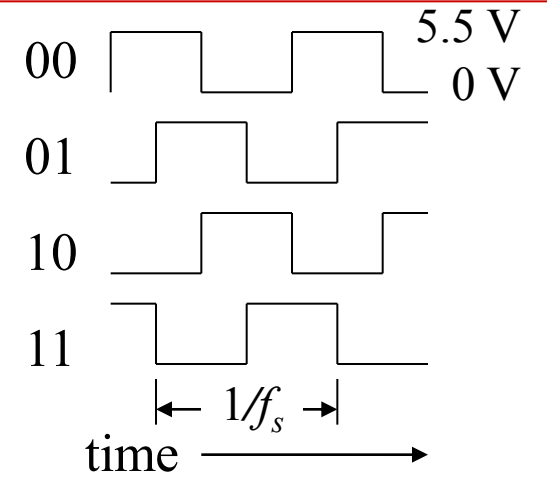
で与えられる. また, $R_2 \gg R_1$ においてパルス幅の検出上限値は,
 $t_1 = -\tau_4 \ln(1-0.36)$ で与えられる.

2.4. 無線タグ端末の構成

パルス鍵及び100kbps
マンチェスタ符号化データ

バラクタダイオード装荷2分割
マイクロストリップアンテナ

4値PSK応答ドライブ波形
($f_s=250\text{kHz}$ で80kbps)



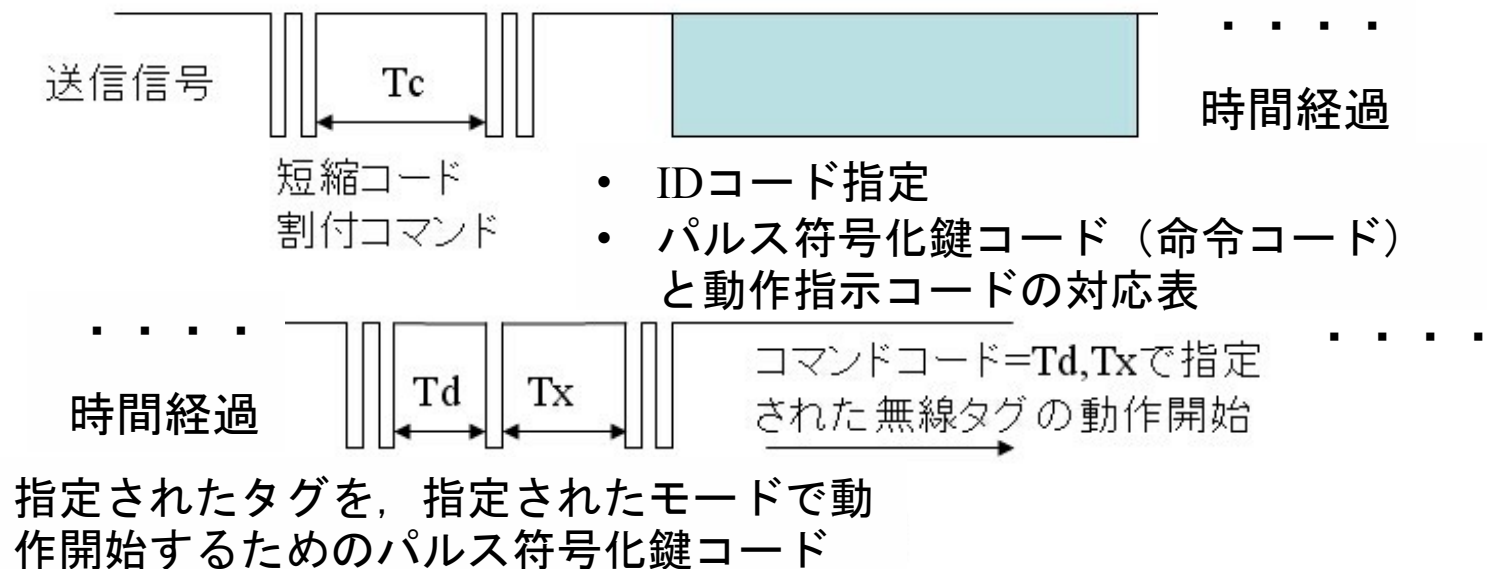
端末の消費電力：

- 連続30sps測位応答動作で90 μ W.
- 連続80kbpsデータ応答動作で500 μ W.
- 連続100kbpsデータ受信動作で420 μ W.
- 連続パルス鍵待ち受け動作で96 μ W.

2.5. リーダ・タグ間の通信プロトコル

パルス鍵を利用した通信プロトコルとその効果

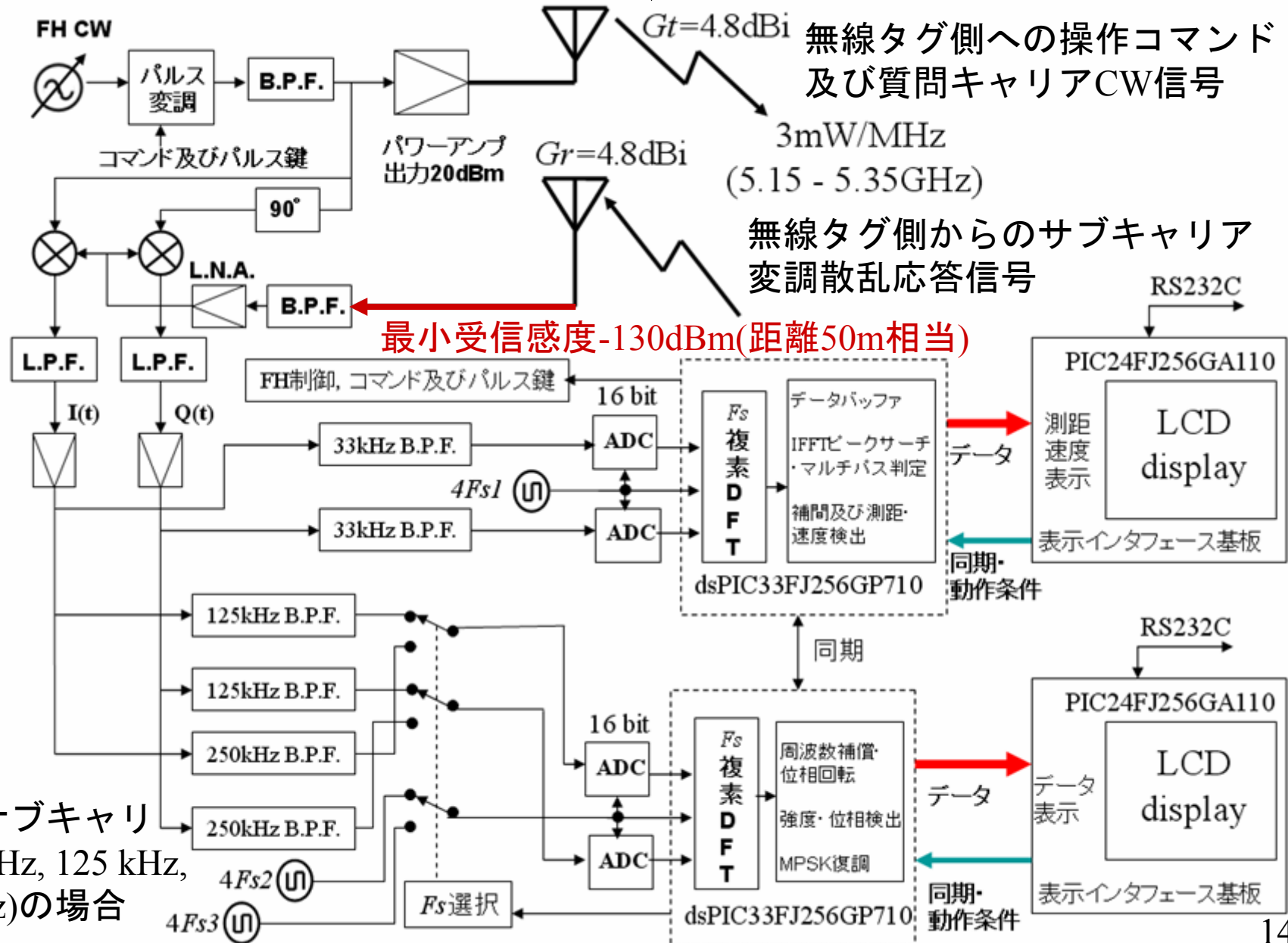
- IDコード読取りに成功した無線タグに対して短縮コマンドパルス符号化鍵を与える.
- 以後, その無線タグは割り込みによるパルス符号化鍵のみで動作させることができる.



タグ内のマイクロプロセッサは, 消費電力が大きいマンチェスタ符号の復調処理等を行うことなく, WDTスリープ状態においてパルス符号化鍵（命令コード）待ち受けを行う事が出来る⇒パルス鍵を用いない従来方式に対して大幅な省電力化とリアルタイム応答が可能.

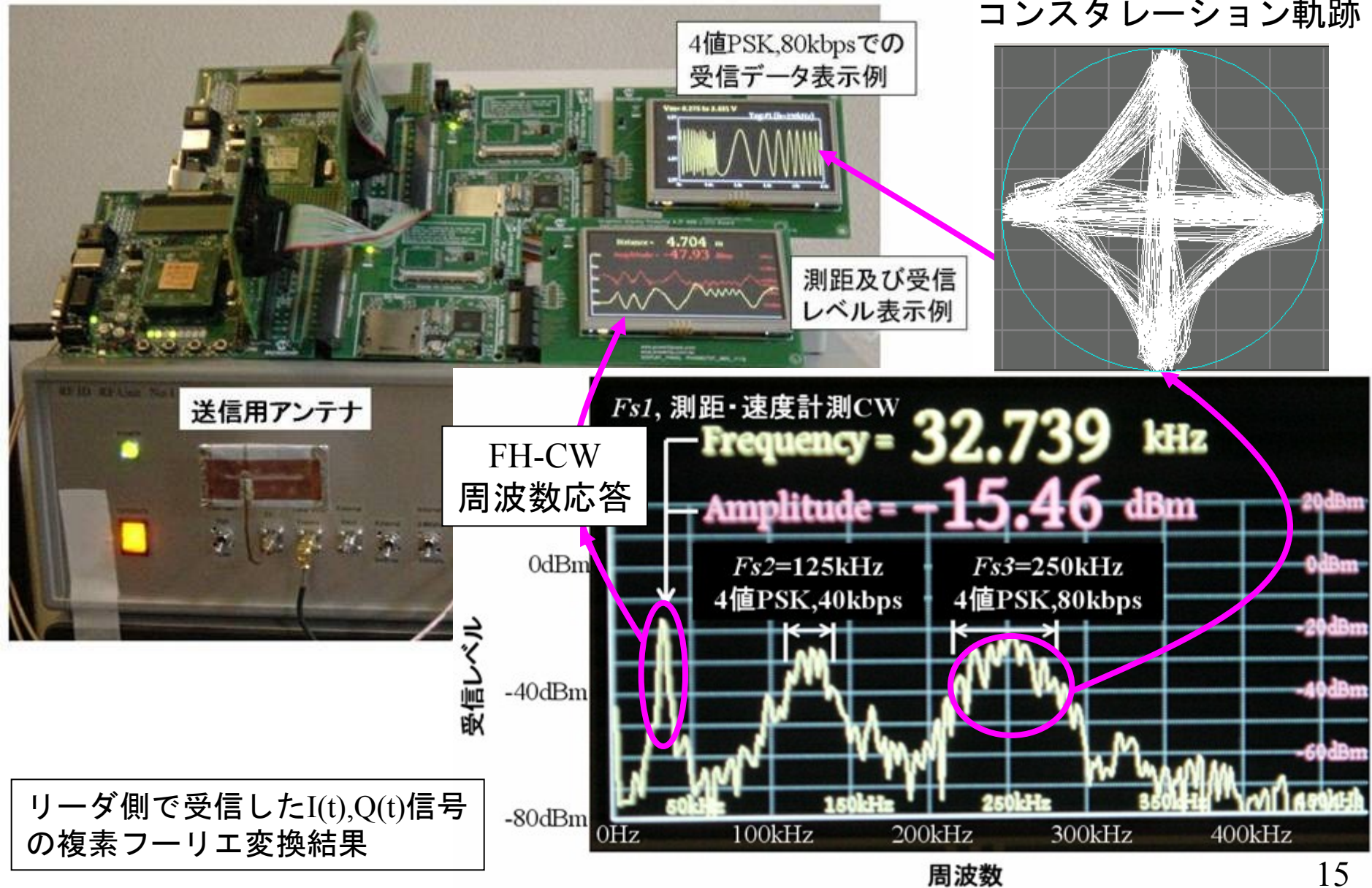
3.1. 無線タグリーダの構成とタグ応答受信信号

無線タグリーダ装置の構成



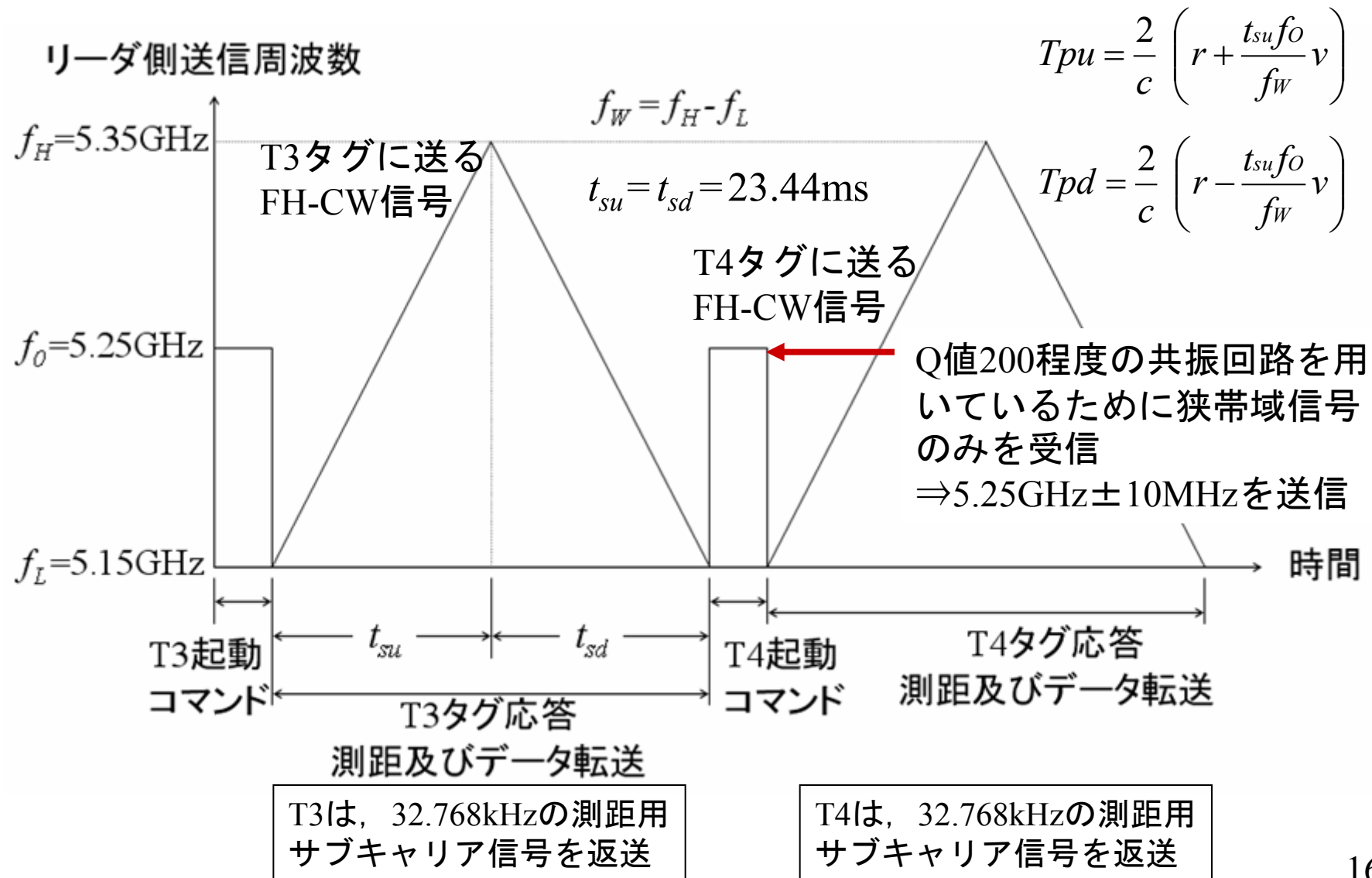
3.1. 無線タグリーダの構成とタグ応答受信信号

無線タグリーダ装置の写真とFDMAマルチキャリアタグ応答信号の受信例



3.2. リーダ・タグ間距離及び相対速度計測

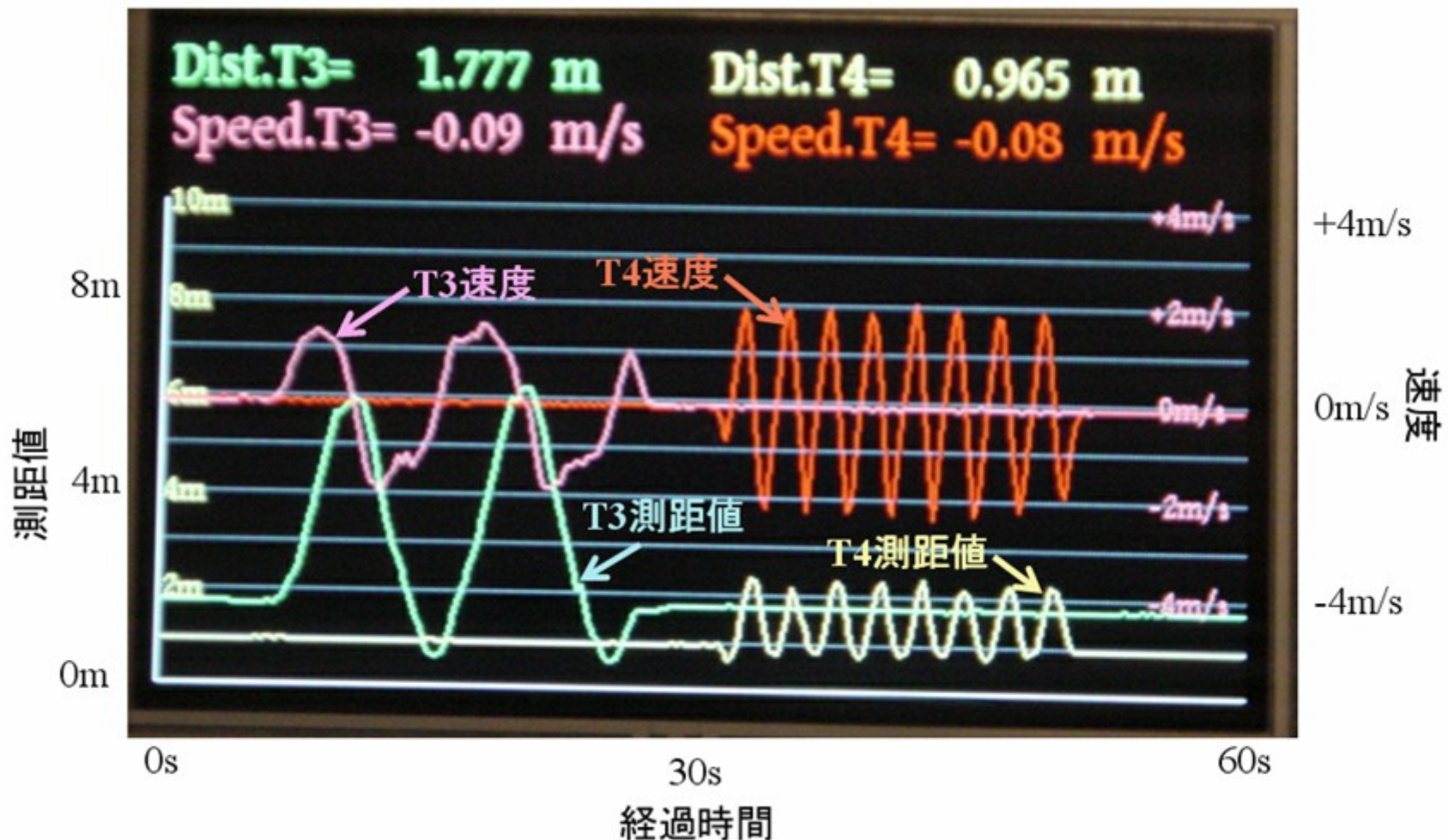
リーダ側送信周波数掃引時間幅 t_{su} 及び t_{sd} で観測された周波数応答の逆フーリエ変換における振幅ピークの検出時間をそれぞれ T_{pu} 及び T_{pd} とすると,



3.2. リーダ・タグ間距離及び相対速度計測

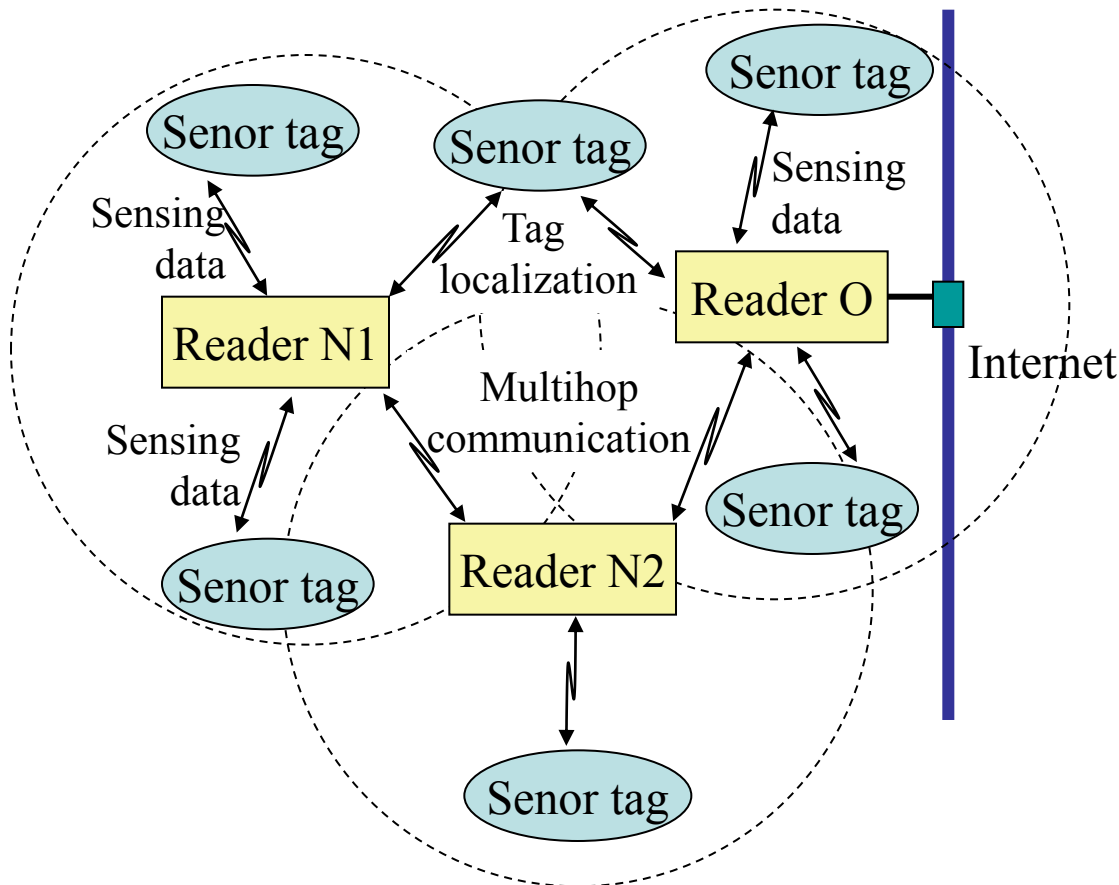
TDMAで2つの無線タグ端末(T3,T4)の距離と速度を連続観測した例

- マルチパス誤差対策として、リーダ側では直接波推定処理を行っている
- 50mまでの距離精度は5cm, 160km/hまでの速度精度は10cm/s
- 無線タグ端末(T3,T4)の消費電力は30sps動作で90 μ W



4.1. センサネットワークの構成

提案する5GHz帯センサネットワークの構成



リーダ・リーダ間通信：

- 4Mbpsのマンチェスタ符号化ASKでFDMAマルチホップ通信
- タグのセンシングデータ共有化・収集

リーダ・タグ間下り通信：

- 100kbpsのマンチェスタ符号化ASKでデータ及び短縮コマンドの割付
- パルス符号化鍵でTDMAリアルタイム通信の同期

リーダ・タグ間上り通信：

- 30-120kbpsのサブキャリアMPSK後方散乱方式で測位とデータ通信

4.2. 無線タグ端末のポジショニング

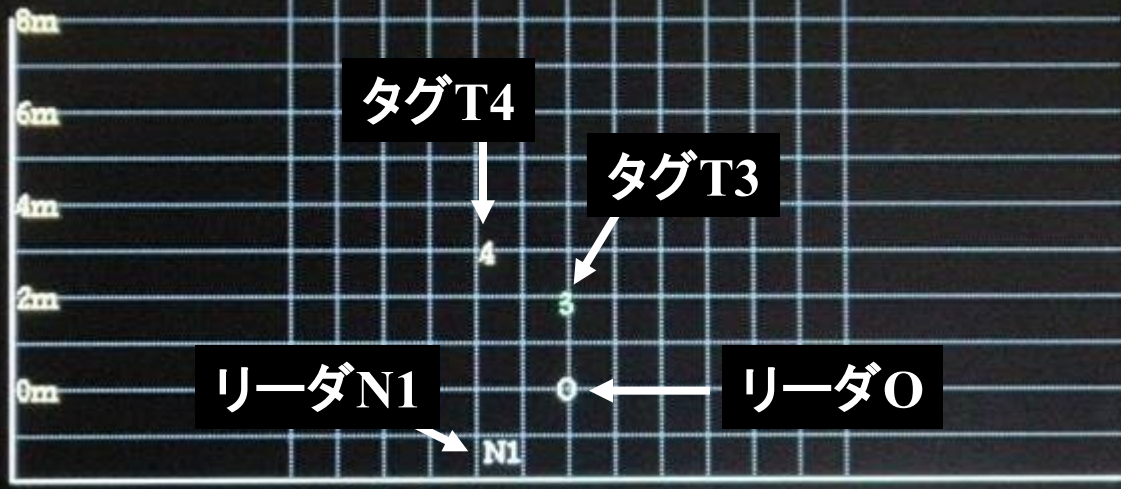
マルチホップ通信でのタグ測距データの収集連続解析例

リーダOからの測距データ→
リーダN1からの測距データ→
リーダOでの観測レベル→
リーダN1での観測レベル→

リーダN1からの測距とリーダOからの測距は周波数掃引開始タイミングを約1msずらすことでほぼ同時に行っている。



Tag.3(X)= 0.00 m Tag.4(X)= -1.70 m
Tag.3(Y)= 1.85 m Tag.4(Y)= 2.95 m



リーダN1 → N2 → O での
マルチホップ通信：

	Primarily-CH	Secondly-CH
N1 ⇔ N2	5.344GHz	5.324GHz
N2 ⇔ O	5.337GHz	5.317GHz

4.2. 無線タグ端末のポジショニング

距離43mまでのタグ位置連続追跡例

Experimental environment

Tag

Result of IFFT

Rx level

0dBm
20dBm
40dBm
60dBm
80dBm

0m

Distance

40m

0s

30s

Time

Result of positioning

7.966 m

50m

Amplitude = -41.72 dBm

0dBm

Rx level

Distance

0m

No error in the backward move

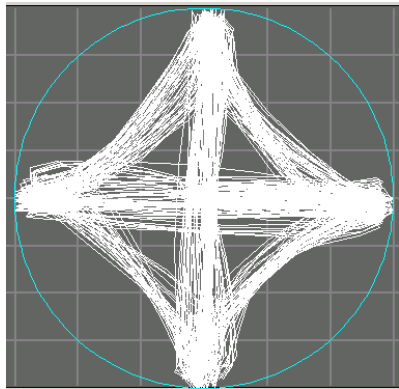
Error due to the shadowing by human in the forward move

-100dBm

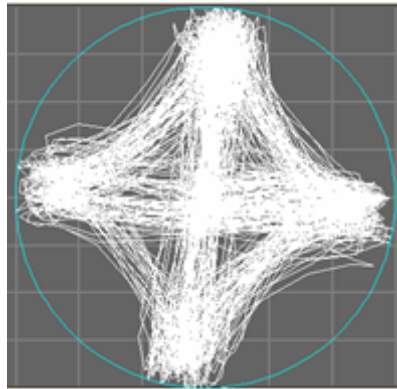
4.3. データ通信

MPSK可変多重化率操作による通信例

4値PSK応答でリーダ・タグ間距離7m及び20m
としたときの受信I-Qコンスタレーション

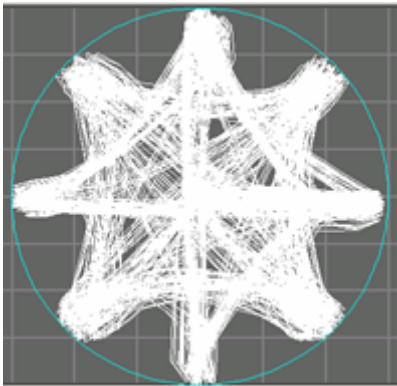


(a) 7m

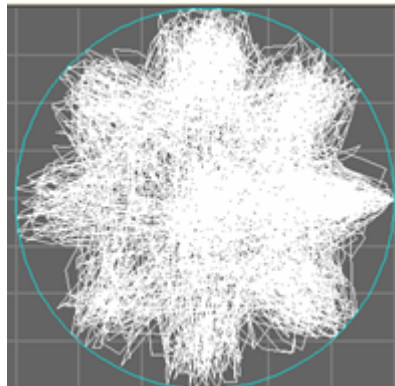


(b) 20m

8値PSK応答でリーダ・タグ間距離7m及び20m
としたときの受信I-Qコンスタレーション

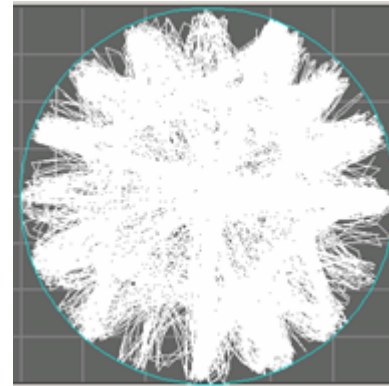


(a) 7m

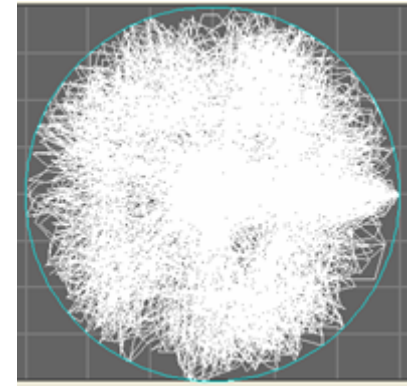


(b) 20m

16値PSK応答でリーダ・タグ間距離7m及び20m
としたときの受信I-Qコンスタレーション



(a) 7m

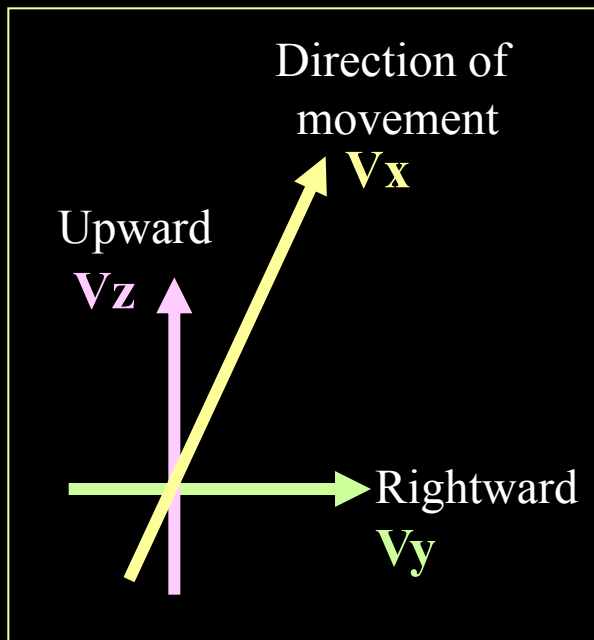


(b) 20m

4.3. データ通信

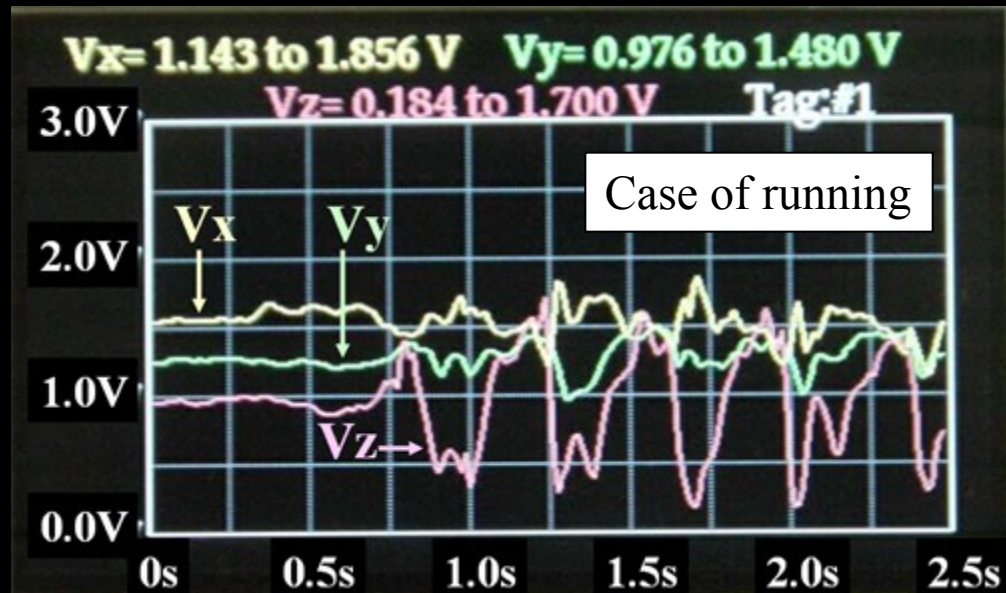
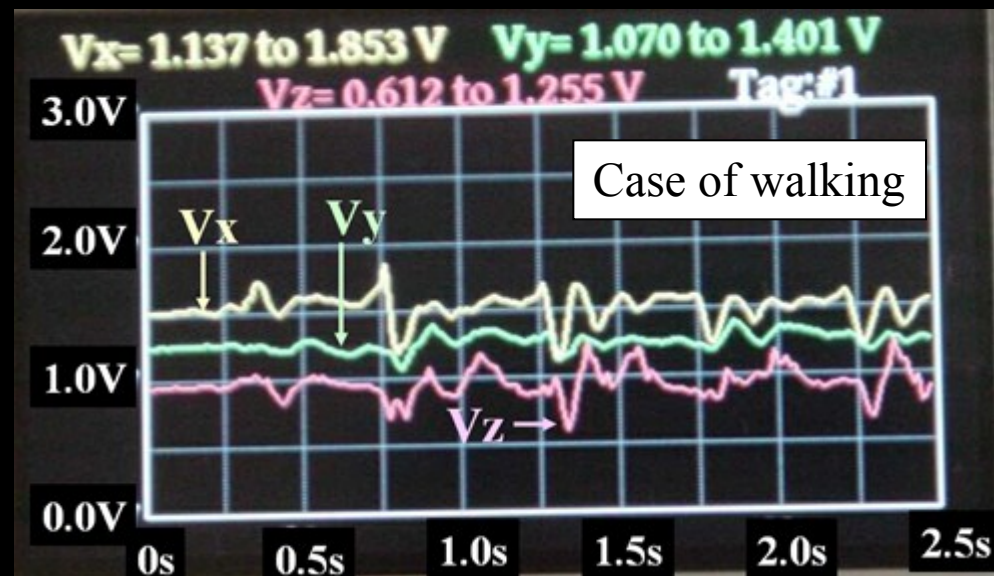
3軸加速度センサデータの無線遠隔モニタリング例

Mounting direction of 3-axis acceleration sensor tag.



Tag attached to the human hip.

電圧 V_x, V_y, V_z は x, y, z 方向の加速度に比例



5. まとめ

◆ 無線タグ端末の小型化及び低消費電力化

- ① 受信と応答用アンテナの共用小型化：2分割マイクロストリップアンテナの採用⇒スロットアンテナの1/3の面積，受信応答共用化.
- ② スタブ共振昇圧型ASK 受信復調方式：消費電力は受信待ち受け時で $90\mu\text{W}$ ，5GHz帯-50dBm入力の100kbps受信時で $110\mu\text{W}$.
- ③ パルス符号化鍵検出方式：検出パルス範囲定式化，消費電力は待ち受け時で $3\mu\text{W}$ ，繰り返し50kHzで $27\mu\text{W}$.
- ④ 無線タグ端末の構成：受信待ち受け回路の低消費化とサブキャリアMPSK変調散乱応答方式を用いることにより，100kbpsリアルタイム双方向データ通信時の消費電力は $500\mu\text{W}$ 以下，30spsの無線タグ端末測位において $90\mu\text{W}$.
- ⑤ リーダとタグ端末間の通信プロトコル：短縮コマンドパルス符号化鍵による低消費電力受信待ち受けとTDMA通信.

◆ 無線タグリーダの開発及びセンサネットワークの構築

- ⑥ 50mまでの距離で距離精度5cmの測位，160km/hまで速度精度10cm/sを達成.
- ⑦ タグ・リーダ間及びリーダ・リーダ間でのマルチホップ通信を実現⇒リアルタイムのデータ共有化と収集解析が可能.
- ⑧ タグ・リーダ間のマルチキャリアFDMA通信⇒並列アクセスが可能，タグ側でリーダからの情報表示も可能.

(参考資料) 本研究関連の学会発表

- [1] 北吉, 澤谷: “RCR STD-1仕様で無電源10m応答可能なRFIDタグ用アンテナの検討”, 信学'04 総大, B-1-50, Mar. 2004.
- [2] H. Kitayoshi, K. Sawaya, “Development of a Passive RFID-Tag with 10-m Reading Distance under RCR STD-1 Specification”, 2004 International Symposium on Antennas and Propagation, Sendai, JAPAN, Proceedings of ISAP'04, pp. 969-972, Aug. 2004.
- [3] 北吉, 澤谷: “無電源10m超応答可能な無線タグ温度センサ”, 信学技報, WBS2004-152, AP2004-333, RCS2004-420, MoMuC2004-203, MW2004-330, Mar. 2005.
- [4] 北吉, 澤谷: “ITSセンサネットワーク用30m応答可能なパッシブ無線タグ”, 信学'05 総大, ABS-2-2, Mar. 2005.
- [5] H. Kitayoshi, K. Sawaya, “Long Range Passive RFID-Tag for Temperature Monitor System”, 2005 International Symposium on Antennas and Propagation, Seoul, KOREA, Proceedings of ISAP'05, pp. 1257-1260, Aug. 2005.
- [6] H. Kitayoshi, K. Sawaya, “Long Range Passive RFID-Tag for Sensor Networks”, 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, Dallas, U.S.A. Proceedings of VTC2005-Fall, Vol. 4, pp. 2696-2700, Sep. 2005.
- [7] 北吉, 澤谷: “パッシブ無線タグのためのレクテナに関する一検討”, 信学'06 総大, CBS-1-5, Mar. 2006.
- [8] 北吉, 澤谷: “柔らかい薄型キャビティ付きスロットアンテナ”, 信学'06 ソ大, B-1-96, Sep. 2006.
- [9] H. Kitayoshi, K. Sawaya, “Passive Temperature Sensing Tag for Sensor Networks”, 2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Guilin, CHINA, Proceedings of ISAPE'06, pp. 1126-1129, Oct. 2006.
- [10] H. Kitayoshi, K. Sawaya, “Long Range Passive RFID-Tag System for Hyperbolic Localization”, 2006 International Symposium on Antennas and Propagation, Singapore, Proceedings of ISAP'06, Session B-17, Nov. 2006.
- [11] 北吉, 澤谷: “セミパッシブ無線タグの長距離化に関する検討”, 信学'07 総大, B-5-20, Mar. 2007.
- [12] 北吉, 澤谷: “サブキャリア変調波を用いた長距離・超低消費電力無線タグ”, 信学技報, SIS2007-47, pp. 13-18, Dec. 2007.
- [13] 北吉, 澤谷: “5GHz帯センサネットワークシステムのための測位可能なリアルタイム無線データ通信端末の低消費電力化の検討”, 信学技報, SR2009-64(pp. 87-94), AN2009-34(pp. 79-86), USN2009-37(pp. 61-68), Oct. 2009.
- [14] 北吉, 澤谷: “5GHz帯測距無線タグシステムの開発”, 信学'10 総大, B-20-13, Mar. 2010.
- [15] 北吉, 澤谷: “5GHz帯でリアルタイム測位可能な低消費電力センサ無線タグシステムの開発”, 信学技報, CS2010-36, pp. 49-54, Sep. 2010.
- [16] 北吉, 澤谷: “路車間・車車間通信のための変調散乱応答を用いた距離・速度計測とデータ伝送方式”, 信学技報, CS2011-43, pp. 93-98, Sep. 2011.
- [17] 北吉, 澤谷: “5GHz帯でユビキタス家電のためのマルチメディア無線タグシステムの開発”, 信学技報, RCS2011-149 (pp. 55-61), SR2011-52(pp. 57-63), USN2011-29(pp. 37-43), AN2011-27(pp. 37-43), Oct. 2011.
- [18] H. Kitayoshi, K. Sawaya, H. Kuwano, “Development of a 5 GHz Band Realtime Wireless Sensing System with Low Power Consumption for Sensor Networks,” IEEE SENSORS 2012, Taipei, Taiwan, Oct. 2012.

(参考資料) 本研究関連の特許

- [1] H. Kitayoshi and K. Sawaya, “ RF ID Tag Device,” United States Patent no. US 8179263 B2, Date of patent: May 15, 2012, and Korean Patent no. 10-1083614, Date of patent: Nov. 9, 2011, and Japanese Patent no. 4328705, Date of patent: June 19, 2009.
- [2] H. Kitayoshi and K. Sawaya, “ Sensor Tag, Sensor Tag Device, Power Receiving Circuit, Sensor Tag Device Power Supply Method,” WIPO PCT International Publication no. WO2007/010869A1, Date of publication: Jan. 25, 2007, and Japanese Patent no. 4725979, Date of patent: Apr. 22, 2011.
- [3] 北吉均, 澤谷邦男, “無線タグ装置、受電力回路、および無線タグ読み取り方法,” 日本国特許第5031913号, 登録日: 2012年7月6日.
- [4] H. Kitayoshi and K. Sawaya, “ Thin Slot Antenna Having Cavity, Antenna Power Feeding Method, and RFID Tag Device Using the Antenna and the Method, ” WIPO PCT International Publication no. WO2008/029769A1, Date of publication: Mar. 13, 2008, and Japanese Patent no. 4874035, Date of patent: Dec. 2, 2011, and United States Patent no. US 8253640 B2, Date of patent: Aug. 28, 2012.
- [5] H. Kitayoshi, “ Radio Tag, Radio Tag Reader, Pulse Encoding Key Detection Circuit, and Radio Tag System Using Them,” WIPO PCT International Publication no. WO2008/111435A1, Date of publication: Sep. 18, 2008, and Japanese Patent no. 4823943, Date of patent: Sep. 16, 2011.
- [6] H. Kitayoshi and K. Sawaya, “ Microwave Band Booster Rectifier Circuit, and Wireless Tag Device and Wireless Tag System Employing Same,” WIPO PCT International Publication no. WO2012/090840A1, Date of publication: July 5, 2012.