

無線と高周波の技術解説マガジン

# RFワールド

RADIO FREQUENCY

www.rf-world.jp

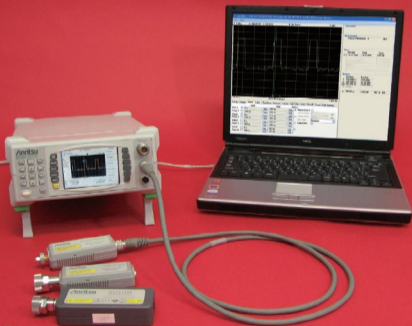
トランススタ技術 増刊

**特集** シグナル・アナライザ/パワー計/光電界センサ/放射計など  
電波を測る・電波で測る

特設記事 最新RFパワー・アンプの回路/システム/テクノロジー

折り込み付録 テレビ放送/衛星放送/CATVなどの周波数チャートⅡほか

No.12



CQ出版社



出力 10 mW の電波は屋外の見通し環境で  
どこまで飛ぶかを検証する

## ZigBeePRO モジュールの 伝搬実験報告

小野寺 福司  
Fukushi Onodera

### 概要

ZigBee 規格が世の中に出てから久しく、その用途としてワイヤレス・センサ・メッシュ・ネットワークが想定されています。2.4 GHz 帯では、Bluetooth のように人の手の届く範囲や室内で使う用途の場合は、どこまで届くのかを気にする必要はないと思われます。しかしながら ZigBee のように用途がセンサ・ネットワークとなると、屋外で使われることも十二分に想定でき、どこまで電波が届くかを評価する必要が出てきます。

今回の伝搬実験では、結果として出力 10 mW の



〈写真1〉 ZigBeePRO モジュール AD1321-10MW (出力 10 mW) と汎用アンテナ (ゲイン 2 dBi)

ZigBeePRO モジュールで 1000 m 以上の距離を伝搬できることがわかりました。

2.4 GHz 帯の無線 LAN では、10 mW 以下の出力で高利得アンテナを使って数十 km の距離をポイント・トゥ・ポイント通信を行っている例が見られます。

(<http://bbzero.jp/var/news/index.php?id=080220-1>)

今回の伝搬距離測定実験には、エー・アンド・デイ社 (<http://www.aandd.co.jp/>) の汎用プログラマブル ZigBeePRO モジュール “AD1321-10MW” (写真1) とワイヤレス LAN 機器などの 2.4 GHz 帯の機器ではごく普通に見られる汎用アンテナを使いました。

無線の場合、アンテナは伝搬距離を伸ばすのに重要な要素であり、高利得アンテナを使うことができれば、伝搬距離に対して有利になります。ただし、通常の ZigBeePRO の使用形態を考えると高利得アンテナは高価であり、アドホックな使い方を考えると、あまり実用的ではないので、普通に考えられる一般的な使用状態で実験しました。

### 使用機材と実験の準備

#### ■ 使用した無線モジュールおよびアンテナの仕様

使用した AD1321-10MW の仕様を表 1 に示します。

〈表1〉 ZigBeePRO モジュール AD1321-10MW と AD1321-1MW の仕様

項目	AD1321-10MW	AD1321-1MW
プロトコル	ZigBeePRO	
出力電力	10 mW /MHz	1 mW /MHz
受信感度 (1% BER)	- 100 dBm	- 85 dBm
周波数	2405 MHz ~ 2480 MHz	
変調方式	オフセット位相直交変調	
拡散方式	スペクトラム直接拡散	
帯域幅	2 MHz	
電波型式	G1D	
適合規格	ARIB STD - T66, IEEE std 802.15.4	
技術基準適合証明番号	007WWCUL0459	007WWCUL0412
ZigBee 認証番号	ZIG10004PRV3848824	ZIG10004PRV3848824

AD1321シリーズには出力1mWのAD1321-1MWもあります。

アンテナの仕様を表2に示します。また、図1と図2にアンテナの周波数特性と指向特性をそれぞれ示します。

## ■ アンテナ高さ

私たちはZigBeePROの伝搬距離を測るのに、なるべく反射や回折等の伝搬上の不確定要素が入らないよう、正確に測りたいと考えました。そこでアンテナ間ではできるだけ直接波で通信できるよう、アンテナ間のフレネル・ゾーンには妨害するような構造物が入らないようにして実験しました。

### ● フレネル・ゾーンとは

電波の見通し距離と、一般生活でいうそれとは意味が異なります。一般生活で見通し距離といえば「視覚的に見える距離」を指しますが、電波の見通し距離とは「フレネル・ゾーン内に電波に対して影響する物

がない状態が確保できる距離」をいいます。第1フレネル・ゾーン(図3)は以下の式で計算できます。

$$r = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \dots\dots\dots (1)$$

$r$  : 第1フレネル・ゾーンの半径 [m],  $d_1$ および $d_2$  : 距離 [m],  $\lambda$  : 電波の波長 [m]

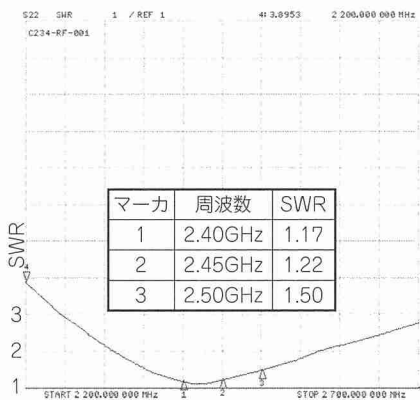
したがって必要なアンテナ高 $h$ は以下の式で求められます。

$$h = \sqrt{\frac{L\lambda}{4}} \dots\dots\dots (2)$$

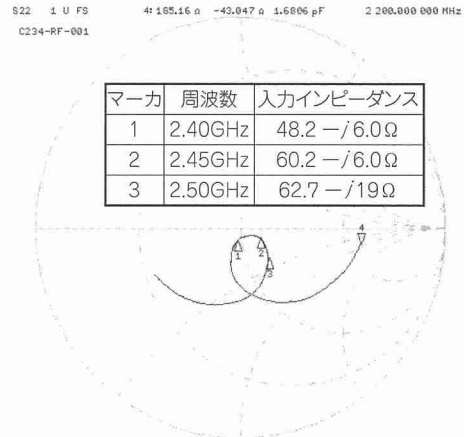
$h$  : アンテナ高 [m],  $L$  : アンテナ間の距離 [m]

〈表2〉使用したアンテナの仕様

項目	仕様
周波数範囲	2.4~2.5 GHz
VSWR	2以下
インピーダンス	50 Ω
利得	2 dBi ± 0.7 dB @ 2.45 GHz
コネクタ	U. FL(ヒロセ電機)

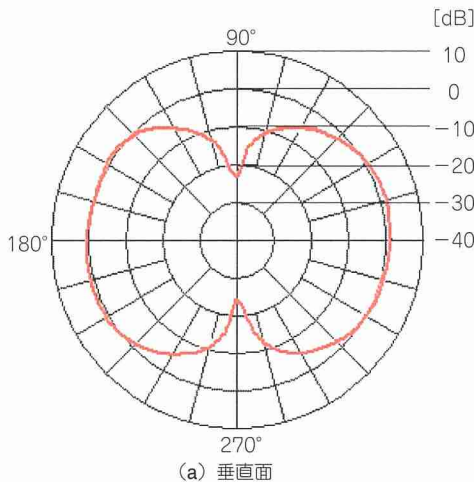


(a) SWR(スパン: 2.2~2.7GHz)

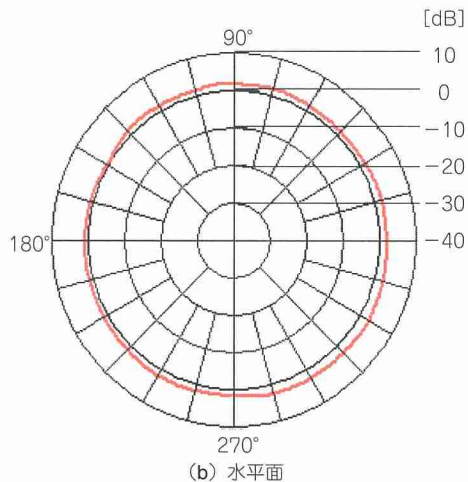


(b) 入力インピーダンス(2.2~2.7GHz)

〈図1〉使用したアンテナの周波数特性



(a) 垂直面



(b) 水平面

〈図2〉使用したアンテナの指向特性

計算結果を表3に示します。

私たちの実験では目標伝搬距離を1000 mとしたので約5.6 mの地上高が必要になりますが、アンテナの下で人が作業することを考えると、人の身長を考慮して最低約8 m高のアンテナ支柱を用意しなければなりません。

## ■ 実験場所

今回の実験で一番大きな問題として、場所の選定がありました。周りに電波伝搬に影響するような物が何もなく、数kmの直線が確保できる場所が必要になります。今回は比較的近い場所にある、さいたま市郊外の荒川の土手で実験を行うこととしました。

図4に赤線で示した場所で3 kmの直線を確保できます。土手の上なので周りが開けており、視覚的な見通し距離だけでなく、電波的な見通し距離も確保できると考えました。

また、移動している自動車による電波の乱反射による影響を考慮し、荒川に架かる橋とつながる道路と道路の間を適地と考えました。

この荒川土手は休日には結構遊びに来る人が多く、

マラソンや近くの大規模グラウンドでの野球やサッカーに興じる人、お弁当を広げている人、ラジコン飛行機やヘリコプタを飛ばしているグループ、アマチュア無線の移動運用等が見られるため、実験は平日の午前を中心に行うこととしました。

## ■ 使用機材

以下の物を用意しました。

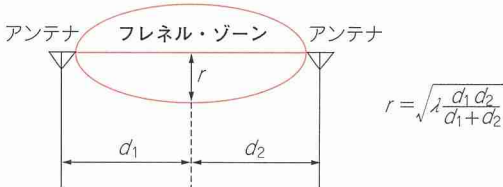
- ZigBeePRO モジュール：AD1321-10MW  
[株エー・アンド・デイ]
- USB変換ボード [株エー・アンド・デイ]
- 汎用ホイップ・アンテナ
- USBケーブル(13 m)
- ポール取り付け金具
- 非常通信用伸縮アンテナ・ポール
- パソコン
- DC-ACインバータ
- 台車

上記中、台車以外の物を2セット用意しました。

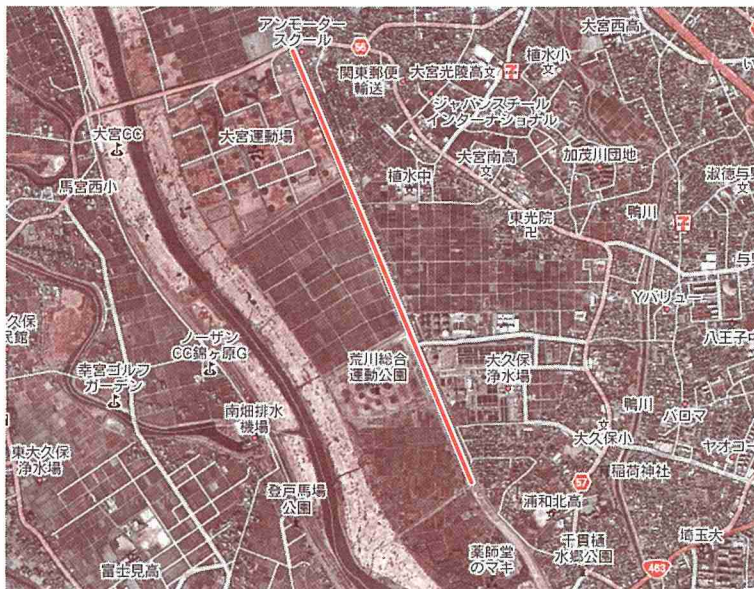
ポール取り付け金具には、アクリル板に

〈表3〉アンテナ間の距離と見通し通信に必要なアンテナ高

アンテナ間の距離L [m]	必要なアンテナ高h [m]
1000	5.58
1200	6.12
1400	6.61
1600	7.06
1800	7.49
2000	7.90



〈図3〉第1フレネル・ゾーン



〈図4〉実験場所の上空写真 [©2010 Google]

ZigBeePRO モジュールをセットしたUSB変換ボードとアンテナを写真2のように搭載し、アンテナは接続するポールの頭より1波長分離れるようにしました。

USB変換ボードは、パソコンからUSBで出力される制御コマンドやデータをZigBeePROモジュールの通信入出力であるSPIに変換するためのボードです。

非常通信用伸縮アンテナ・ポールは、縮めた状態で2.3mほどですが、高さ10mまで伸びる物です。今回はアンテナが非常に軽いのので、ステーを張る必要がなく、ポールに付いている支脚だけで設置できました。

これらのセットの一方を固定局(写真3)とし、もう片方のセットを台車に乗せ移動局(写真4)としました。



〈写真2〉アクリル板にZigBeePROモジュールやアンテナを配置してポールへ取り付けける

## 伝搬実験

### 実験環境

実験は8月の中旬、日中温度が35℃を越える高温多湿度の中、行うこととなりました。

時間は10時から14時であり、午前中は無風の曇り、午後からは無風の快晴と非常に強い日差しの中で実験しました。

近くに大きな川が流れていることや、気象条件から、ラジオ・ダクトなどの異常伝搬が起きる可能性がある



〈写真3〉固定局のようす



(a) 台車上のパソコンと伸縮ポールの基部



(b) 伸縮ポールを操作中のようす

〈写真4〉移動局のようす

〈表4〉伝搬実験の結果

伝搬距離 [m]	エラー・レート (PER) [%]	最大入力信号電力		最小入力信号電力	
		[hex]	[dBm]	[hex]	[dBm]
200	0.0	B6	-73.0	A5	-76.0
400	1.5	87	-81.2	80	-82.5
600	0.0	85	-81.6	75	-84.4
800	2.0	63	-87.6	55	-90.0
1000	0.0	6F	-85.5	69	-86.5
1200	0.5	5D	-88.6	52	-90.6
1400	1.0	56	-89.9	4C	-91.6
1600	3.0	40	-93.7	34	-95.8



〈写真5〉1600 m地点付近の盛り土



〈写真6〉1600 m地点から固定局を見た景色

と思われ、電波伝搬実験を行うにあたり不安定要素となりました。

## ■ オペレーション

地上高10 mの地点にアンテナを設置し、一方を固定局、他方を移動局としました。それら無線局2点間で、距離200 mおきに通信実験を行い、そのときの通信エラーと信号強度を測定しました。

送受のデータは、ランダム・データを1パケットとし、それを200パケット固定局側から送り、移動局側で受信して、そのままデータを移動局から固定局へ返信し、固定局側で送信時と受信時のデータを比較して伝搬エラー率を見ます。パケット・データには誤り訂正符号を付けませんでしたし、データの誤りがあってもリトライ通信の動作を行っていませんので、単純なデータ比較だけです。信号強度は、移動局から固定局へデータを送り返したときの値を測定しました。

なお、信号強度はAD1321-10MWに標準で内蔵されている入力電力測定機能を使います。これは-60 dBm以上をFFhとし、-105 dBm以下を00hとして、その間を255分割して表記された値が出力されます。AD1321-10MWは測定器ではないので大まかな値ですが目安にはなります。

実際のデータの送受信はWindowsの付属ソフトで

あるハイパー・ターミナルを使ってZigBeePROモジュールにUSBを介して送り、直接コントロールを行いました。これら伝搬実験のための、PCからは送信コマンドを打つだけで、パケットの送信・受信、エラー率の計算、信号強度の測定を行うプログラムはAD1321-10MW ZigBeePROモジュールのユーザー用の空きROMエリアに書き込みました。ほかにはコントロール用のCPUを使っていません。

## 結果と考察

### ■ 実験結果

表4が実験結果です。入力信号電力の数値から見て、伝搬距離に関しては未だ余裕があると思われます。距離2000 m以上でも今回使った10 mWモジュールは伝搬できると推測できます。

2000 m以上も測定しなかったのですが、1600 m先に高さ10 mに近い大きな盛り土(写真5)があり、視覚的にも、電波的にも見通し距離ではなく、またそれにより先の道が中断されていたので、1600 m以上の実験は断念しました。なお、写真6は1600 m地点から固定局側を見た景色です。

## ■ 1 mW品との比較

今回使用したZigBeePROモジュールには、出力1 mWのAD1321-1MWもあり、先の表1に記したように出力電力だけでなく受信感度も10 mW品と異なります。

以前、そのモジュールについて勤務先の会社敷地内で伝搬実験を行ったことがあります。目標距離を100 mとしたので、アンテナ高2 mで伝搬実験を行いました。詳細結果は割愛しますが、140 mまでエラー・レート0%を確認しました。それ以上の距離は実験場所の広さの問題で行えませんでした。

ここで伝搬距離に係る自由空間伝搬損失について次の式があります。

$$L = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

$L$  : 伝搬損失,  $d$  : 距離 [m],  $\lambda$  : 波長 [m]

1 mW品と10 mW品では、出力電力と受信感度の差から25 dBの利得差が生じます。空間減衰条件は別にして、利得差を考慮し式(3)から逆算して距離にして約17.8倍の開きが出てくるのがわかります。

実験場所の広さの問題はありますが、実測値として1 mW品と10 mW品では距離にして10倍以上の差が生じると考えられます。

## ■ 実用上の伝搬距離や設置方法など

本実験はZigBeePROはどのくらい飛ぶのだろうという単純な発想の元に行いました。実際に使用する現場ではフレネル・ゾーンを確保するのは非現実的であり、電波の反射や回折、他の無線機器からの干渉等が生じることが十二分にあり得るので、本機に限らず、無線機器を設置する場合は実際に使用する場所で通信や伝搬実験を行い、適切にアンテナを設置する必要があります。

決して整理整頓ができていないといふ難い勤務先オフィスにて、ZigBeePROモジュールを机の上に置いた状態で1 mW品の場合は20 mくらい、10 mW品の場合は100 mくらいは届いていました。無論、間にスチール製の扉や本棚の壁や針金がメッシュ状に入っているガラスなどがある場合は伝搬距離に影響が出てきますので、一般的に何mWだから何m飛ぶと断言するのは困難です。

また、無線機器を近接して使用すると、受信部のLNAが飽和して通信ができなくなることがあります。出力が微弱で受信感度も悪い無線機器ですと問題にはならないのですが、本実験で使用した10 mW品のように出力も受信感度も高い場合は、近接での使用は問題となります。使用する場所に応じて1 mW品を設置するか、10 mW品を設置するか検討する必要があります。

きます。

## ■ その他

今回の実験で連絡用に特定小電力のトランシーバ(420 MHz)を使いましたが、やはりというか800 mを過ぎた辺りでノイズが多くなり、1000 mの地点では音声が入りにくく埋もれてしまい使えなくなりました。周波数からして回り込みがあるので、特定小電力のトランシーバの方が飛びが良さそうに思えるのですが…結局、固定局との連絡には、実験場所から携帯電話の基地局をいくつか目視で確認できるので、そちらを使用することとなりました。

実験場所として選んだ場所は、元々サイクリング・ロードなので、平たんだと思っていたのですが、結構な起伏があり、800 mの地点は窪地気味になっていました。また、交通標識が多くあり、高さもあるので、それらが障害物としてフレネル・ゾーンを満足できていないかもしれません。

また、平日にも関わらず思いのほか人出や交通量が多く、とくに固定局を設置した所は土手の下に大きく広がる田圃の手入れのための大型農業用車両が直ぐ傍を頻繁に行き来していたり、移動局側では1000 mと1200 mとの間の地点で8 m高の4エレ50 MHzデルタ・ループを上げるアマチュア無線局が運用していたり、1600 mの地点では、土手下の大規模グラウンドで女子ソフトボールの大会?が開かれており、そのための大型バスが横切ったりしていました。

距離よりもむしろ、これらがエラー・レート低下の原因と思われる。大型バスが土手を横切ったときの測定値はエラー・レートが6%で、信号電力は最大3 Eh(-94.1 dBm)、最小30 h(-96.5 dBm)へと測定値の低下が見られました。

## 最後に

ZigBeePROは基本的にワイヤレス・メッシュ・ネットワークを構築します。ある2点間で安定した通信を行うことができないのなら、その間にZigBeePRO機器を置くことにより、自動的に無線中継を行ってくれます。中継を行えば、伝搬距離は幾らでも稼げます。今回の実験は「ZigBeePROはどこまで飛ぶのだろうか?」という私の好奇心によるものです。

最後に、35℃を越えるたいへん暑い中、実験を手伝ってもらった小岩井淳志君、蘇世維君、佐藤公平君、協力頂いた村田豊氏、各位に謝辞を述べさせていただきます。

おのぞら・ふくし

(株)イー・アンド・デイ 設計開発本部

