

FM 放送波を用いた物体検知

木 谷 博*

Object Detection Using FM Broadcasting Electromagnetic Wave

Hiroshi Kitani

When the object approaches the transmitting antenna and the receiving antenna which are located nearby, the receiving level will change. If this change is recognized, the object detection or the intruder detection will be realized. The field test in 40MHz were done for body detection. System test result were reported ⁽¹⁾.

Frequency of 40MHz is not allocated for the purpose of the object detection. If FM broadcasting electromagnetic wave is used for the object detection, the system will be realized without the frequency allocation. The height of the body nearly equals one half wavelength.

The FM broadcasting electromagnetic wave is radiated in horizontal polarization in Japan. However, the body stands vertically. The interference between the vertically standing body and the horizontal polarization detection antenna, or the vertical polarization detection antenna under the horizontally polarized wave are not able to be evaluated.

The following antennas were examined as the detection antenna in field test; horizontal polarization half-wavelength dipole antenna, vertical polarization half wavelength dipole antenna, collinear array antenna, surface-wave mode antenna, and twisted pair antenna. Later three type antennas were used in order to obtain linearly expanded detection area. System design, configuration and test result are reported.

1. 序論

人の検知には、赤外線、マイクロ波、超音波などを人体に当てその透過特性や反射特性などを利用したもの、人が電線に近づいたときの電界変化を利用したもの、人が電線に触れた結果導通が断になるのを利用したものなど、様々なものがある。

受信アンテナに物体を近づけると受信アンテナの受信レベルが変化する。この変化を認知すれば物体検知や侵入者検知ができると考えられる。この考えを実際に確認するため、送受2つのアンテナを立てて周波数40MHzで実験を行い、一通りのデータが得られたので先に報告した⁽¹⁾。周波数40MHzは電波放射の許可の取得が必要である。これを避けるため、今回空中に放射されているFM放送波を用いて侵入者検知ができないか試みた。

以下、原理、実験システムの構成、実験結果などについて述べる。

* 電気工学科

2. FM放送波を用いた侵入者検知の原理

2. 1 基本原理

図1に示すようにFM放送アンテナからの電波が届く位置に受信アンテナをおき、受信したFM電波の受信ベクトルを \dot{A}_0 とする。人間がアンテナに近づくと、人間からの電波反射あるいは人間と受信アンテナの相互作用により受信ベクトルが \dot{A}_0 から \dot{A} へ変化する(図2)。受信ベクトルの変化分 $U = |\dot{A} - \dot{A}_0|$ が大きいと

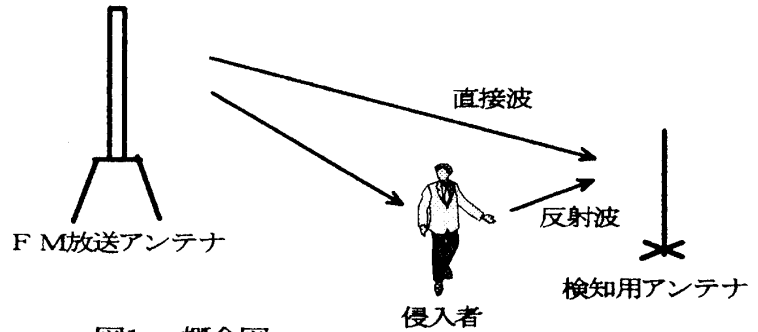


図1 概念図

「侵入者あり」と判断する。

一般にFM放送は水平偏波で送られている。したがって垂直に立って歩行する人間が水平偏波の受信アンテナに対して、あるいは垂直偏波の受信アンテナに対してどのような反応を示すかは不明である。

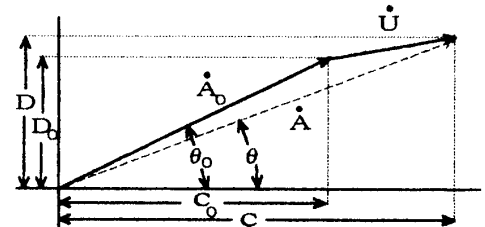


図2 ベクトル図

2. 2 受信ベクトルの検出

図3は受信ベクトルの直交成分CとD(図2)を検出する同期検波回路である。この回路のS端とL端には侵入者検知用アンテナ(以下、検知アンテナ)と、このアンテナで受信される信号をベクトルとして検出するために必要な局発信号受信アンテナ(以下、局発アンテナ)を接続する。局発アンテナは人間からの影響を受けないような位置に設ける。

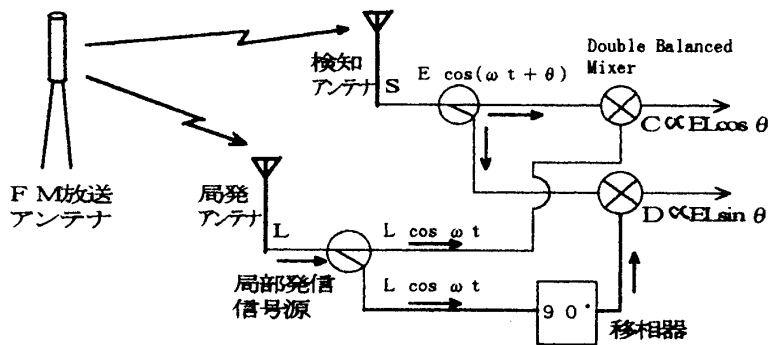


図3 受信ベクトル検出回路

同期検波回路には2つの分配器、2つのミキサー、90度移相器があり、受信ベクトル \dot{E} の直交成分(C, D)が検出される。

0° 方向成分

$$C = \frac{EL}{2} \cos \theta$$

90° 方向成分

$$D = \frac{EL}{2} \sin \theta$$

ここでEは受信ベクトルの振幅、Lは局発の振幅、 θ は受信ベクトルの位相である。

2. 3 データ処理

前回の 40 MHz の実験では、直交出力 (C, D) から人間がいないときの直交出力 (C_0 , D_0) の抽出をパソコンが自動的に行った⁽¹⁾。今回の実験ではデータが不十分なため、このような方法はとらず、人間がいないときにパソコンを立ち上げてまず直交出力 (C_0 , D_0) を記憶し、その後の直交出力 (C, D) から下記を計算し、これをアナログ信号として出力した。

$$\frac{U}{A}(\text{dB}) = 10 \log \left[1 + \frac{C^2 + D^2}{C_0^2 + D_0^2} - 2 \sqrt{\frac{C^2 + D^2}{C_0^2 + D_0^2}} \cos(\theta - \theta_0) \right]$$

ここで θ および θ_0 は直交出力の **arctangent** である。

2. 4 検知位相の周波数特性

FM 放送波を同期検波するときには検知位相の周波数特性について考慮せねばならない。すなわち瞬時の周波数は、 f_0 を中心として $f_0 - \delta f$ から $f_0 + \delta f$ の範囲で変化している。図 4 に示すように、FM 放送アンテナから検知アンテナを経由して同期検波回路の S 端に達する電気長を ℓ_1 、また局発アンテナを経由して L 端に達する電気長を ℓ_2 とすると、動作周波数 f_0 と $f_0 + \delta f$ との間には下記の位相差 θ_d が生じる。

$$\theta_d = 360 \frac{|\ell_1 - \ell_2|}{C} \delta f$$

測定に使っている周波数が異なると、受信ベクトルの位相がずれることになる。

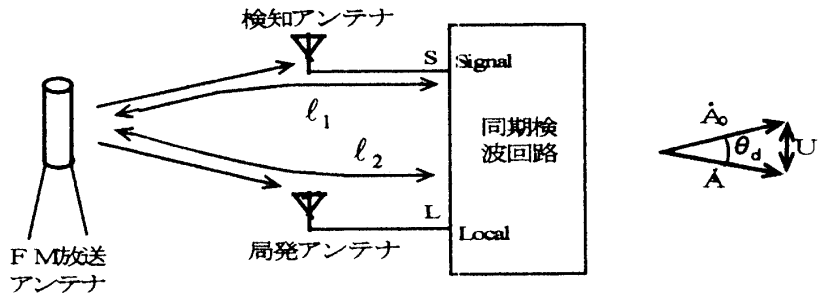


図4 送信アンテナからの経路と周波数によるベクトルずれ

例えば初期に記憶した直

交成分 (C_0 , D_0) が周波数 f_0 で測定され、測定状態に入ったときの直交出力 (C, D) が周波数 $f_0 + \delta f$ であると、例え侵入者がいなくても下記の $U/A_0(\text{dB})$ 値が生じる。

$$U/A_0(\text{dB}) = 10 \log 2 + 10 \log(1 - \cos \theta_d)$$

このため、 $U/A_0(\text{dB})$ を小さくする対策が必要である。その対策の1つは $|\ell_1 - \ell_2|$ を小さくすることであり、他の1つは受信ベクトルを平均化することである。

2. 5 平均化処理

前項で述べた周波数変調による受信ベクトルの角度変動のほかに、実際にはFM放送アンテナから受信アンテナに至る電波伝播路の周波数特性、さらに時間的な変動などがあると予想される。これらの変動は平均化処理すれば軽減できると考え、次の処理を行った。

処理1：検知ベクトルの先端が図5の網掛け範囲で変動しているとする。直近の直交出力 (C_i , D_i) から、M回分までさかのぼる直交出力 (C_i , D_i) を平均化する。瞬時データをこのように平均化すれば、FM放送の搬送周波数付近の $C(t)$ と $D(t)$ を得ることができ、これを使

って $U/A_0(\text{dB})$ を計算する。なお、コンピュータ立ち上げ時の直交出力 (C_0, D_0) の測定に際してもこれを行う。

処理 2 : 処理 1 で得られた $U/A_0(\text{dB})$ を更に N 回平均化したものを最終出力とする。

後述の実験では $M=20$, $N=20$ とした。 $M=1$, $N=1$ では毎秒 120 回最終出力していたが、上記の平均化処理を行うと毎秒 8 回の最終出力が得られた。これ以下の回数は人間の侵入に対する応答の悪さにつながる。

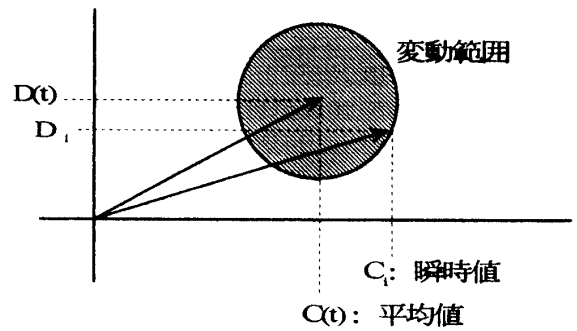


図5 受信ベクトルの変動範囲

3. 実験装置

図6に実験システムの構成を示す。FM放送波は局発アンテナ（5素子水平偏波アンテナ）、検知アンテナでそれぞれ受信され、同期検波回路へ送られる。使用した放送波は地元のFM放送局（FM福井 76.1MHz）である。同期検波回路の周波数選択性を高めるため、入力にはバンドパスフィルタを挿入した。

同期検波回路の直交出力 (C_i, D_i) はA/D変換してパソコンに入力され、ここで $U/A_0(\text{dB})$ が計算され、ディスプレイ装置とタイムチャートレコーダで表示される。

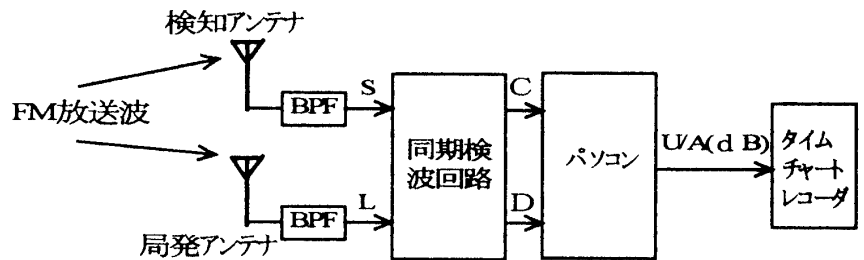


図6 実験システムの構成

前節で述べた検知系と局発系の電気長を支配するものはアンテナ位置、アンテナと同期検波回路をつなぐケーブル、バンドパスフィルタ、増幅器（図示せず）などである。アンテナから同期検波回路入力までの位相の周波数特性を測定し、ケーブルを接続して電気長を補正し、前述の δf （FM放送では 0.075MHz）での位相偏差は 1.5 度以下になるようにして実験を行った。

実験は4階建ての建物の屋上で行った。電波到来方向には8階建ての建物が存在している。

4. 実験結果

4. 1 平均化処理

検知用アンテナとして水平偏波ダイポールアンテナを設置した。測定した $U/A_0(\text{dB})$ 、受信ベクトルの振幅変動、位相変動の経時特性を図7に示す。平均化処理しない場合 $U/A_0(\text{dB})$ のピーク値は約 -20 dB であったものが、平均化処理後は約 -35 dB と大幅に改善されることが分かる。

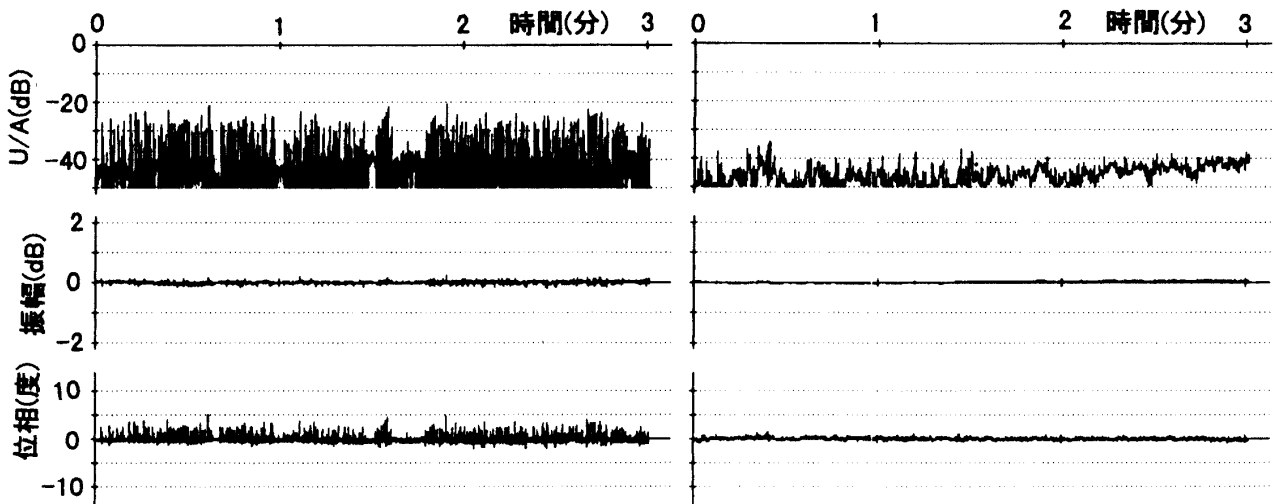


図7 平均化処理による改善効果（左図：平均化処理なし 右図：平均化処理あり）

表1 ケーブル状アンテナ （ケーブル長 約12m）

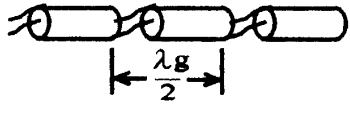
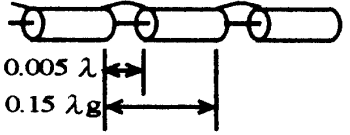
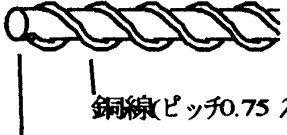
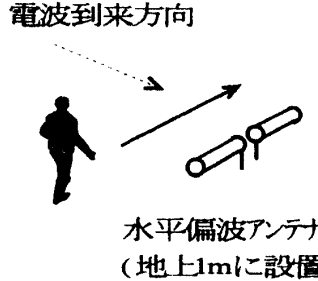
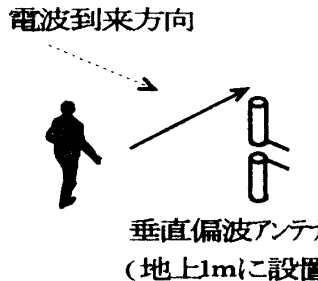
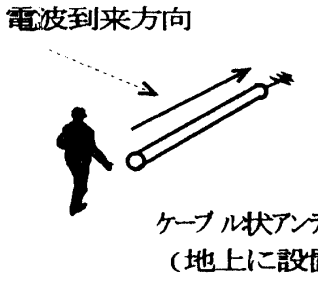
③コリニアアレイアンテナ	④表面波モードアンテナ	⑤撚り対アンテナ
 <p>5D-2Wケーブルを切断し加工</p> <p>偏波：水平 指向性：ブロードサイド</p>	 <p>5D-2Wケーブルを切断し加工</p> <p>偏波：水平&垂直 指向性：エンドファイヤー</p>	 <p>水道用塩ビパイプ</p> <p>偏波：垂直(FM放送波方向) 指向性：ブロードサイドを期待</p>

表2 アンテナ位置と人間の歩行方向

半波長アンテナでの実験 (アンテナ前面1mを矢印のように歩行)		ケーブル状アンテナでの実験 (ケーブルをまたぎながら歩行)
 <p>電波到来方向</p> <p>水平偏波アンテナ (地上1mに設置)</p>	 <p>電波到来方向</p> <p>垂直偏波アンテナ (地上1mに設置)</p>	 <p>電波到来方向</p> <p>ケーブル状アンテナ (地上に設置)</p>

4. 2 アンテナの種類と歩行条件

実験に使ったアンテナは、①水平偏波ダイポールアンテナ、②垂直偏波ダイポールアンテナ、③コリニアアレイアンテナ⁽²⁾、④表面波モードアンテナ、⑤撚り対アンテナ⁽³⁾の5つである。

①～②は検知エリアがアンテナを中心としたある狭いエリアにならざるを得ない。

③～⑤は表1に示すケーブル状のアンテナであり、線状の検知エリアが期待できる。表2はアンテナの偏波および位置、侵入者を模擬した人間の歩行方向など示している。

4. 3 ダイポールアンテナ使用時の歩行テスト

図8に水平偏波アンテナおよび垂直偏波アンテナを検知アンテナとした時の応答特性を示す。

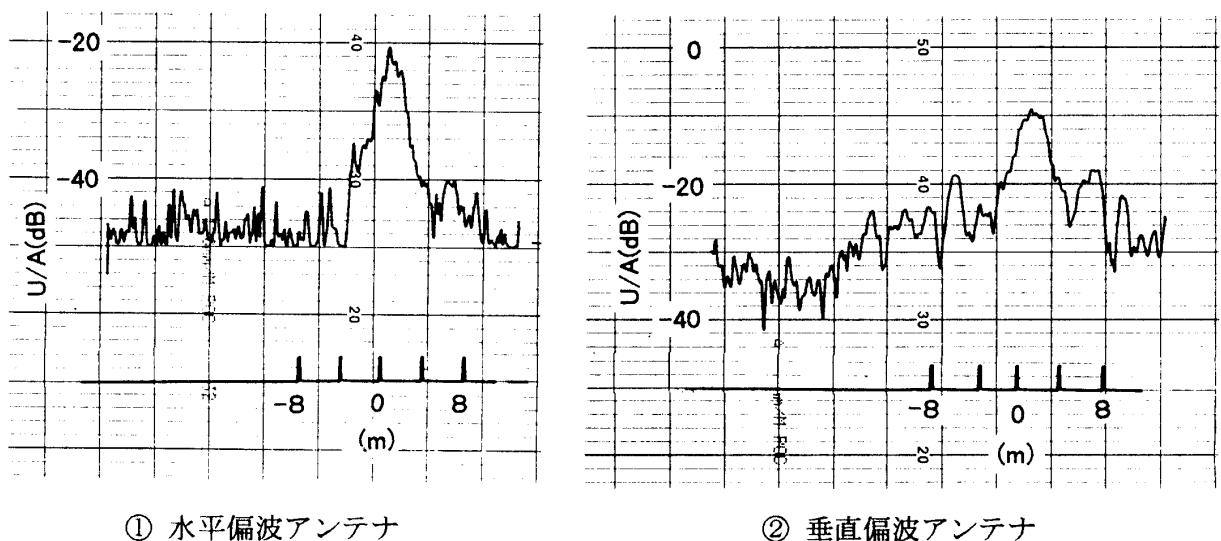


図8 ダイポールアンテナ使用時の歩行テスト

図の横軸は時間に対応しており、当初はアンテナから約15m離れた物陰に人間が隠れており、その後アンテナに向い、さらにアンテナの前面1m点を通り過ぎ去ったときの応答特性で、歩行者の位置をアンテナから4m間隔でマーキングしてある。

① 水平偏波アンテナ：水平偏波を安定に受信しているので、人間がいないときの U/A_0 (dB)は小さい(図の左端付近)。垂直に歩行する人間からアンテナがどの程度影響を受けるか見込みがつかなかったが、 0.15λ 程度の横幅のある人間がアンテナに近づくため、受信ベクトルの変化はある程度生じるようである。図は電波の到来方向に対しアンテナ前面1mを通過するデータだが、実際には前面2m、3m、4mなどについても行った。近い距離(前面1m)では狭い範囲で U/A_0 (dB)が大きく増大し、遠い距離では広い範囲で U/A_0 (dB)小さく増大した。ダイポールアンテナの「8」字状の指向性の影響がそのまま出ているように感じられた。

② 垂直偏波アンテナ：水平偏波の電波の一部が種々の伝播路を経て受信アンテナに達するので、その受信レベルは低く、かつ変動していると考えられる。このため人間がいない部分(図の左端付近)の U/A_0 (dB)は大きくかつ変動している。垂直に歩行する人間が水平偏波を受けて

再輻射した垂直偏波成分を無指向性の垂直偏波アンテナが受信するので、やや広い領域で $U/A_0(\text{dB})$ 値が増大している。アンテナ前面 2 m, 3 m, 4 m などを通過した実験結果（図示せず）においても、 $U/A_0(\text{dB})$ 値が増大している度合いが大きい。

図 9 は $U/A_0(\text{dB})$ の極座標表示である。半径方向は 10dB 毎の $U/A_0(\text{dB})$ の目盛りであり、円周方向は変化分 \dot{U} の方向角を示している。ベクトルの先端の動きが見易いように図の描画は歩行の途中で停止したが、歩行とともに \dot{U} の方向が変化して行くのが認められた。

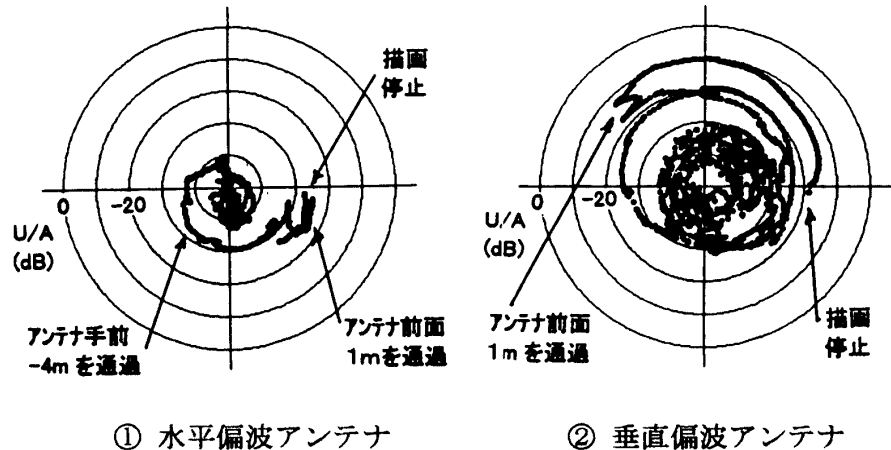


図 9 歩行テストの極座標表示

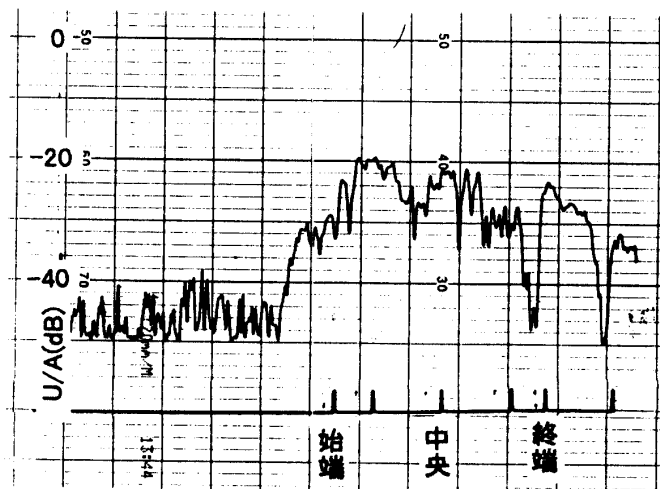
4. 4 ケーブル状アンテナ使用時の歩行テスト

図 10 および図 11 にケーブル状アンテナ 3 種を使用したときの歩行テスト結果を示す。横軸は前述の図と同様、時間である。歩行者の位置を、ケーブル始端、ケーブル中央より手前 4 m, ケーブル中央, 奥 4 m, ケーブル終端, 人間停止点（測定場端のフェンス）の 5 個所にマーキングで示している。

③ コリニアアレイアンテナ：人間が水平偏波アンテナの近傍界領域に侵入して受信ベクトルを変化させるため、ケーブルの始端から終端まで約 20 dB の $U/A_0(\text{dB})$ の増加が認められる。電波到来方向に向ってケーブルを横切るように歩行した場合（図示せず）、ケーブルの真上から離れると $U/A_0(\text{dB})$ の増加は急激に弱まる。線状の検知エリアである。

④ 表面波モードアンテナ：指向性がエンドファイヤーのため、ケーブル始端付近から終端に向って $U/A_0(\text{dB})$ が徐々に増加しているのが認められる。

⑤ 撚り対アンテナ：ケーブル真上ではアンテナの円周方向成分と垂直に立って歩く人間の結合であり、ケーブル真上から離れると垂直偏波成分と垂直に立って歩く人間の結合である。図はまたぎながらの歩行で $U/A_0(\text{dB})$ は増大してい



③ コリニアアレイアンテナ

図 10 ケーブル状アンテナ使用時の歩行テスト

るが、アンテナ前面1 m, 2 m, 3 m, 4 mの歩行においても（図示せず）垂直偏波アンテナと同様、電波到来方向の広い領域で $U/A_0(\text{dB})$ が増加する傾向が見られた。

3つの図から判断する限り、ケーブル長手方向の感度の均一性、感度の切れの点などから、ケーブル状アンテナとしてはコリニアアレイアンテナが適するようである。

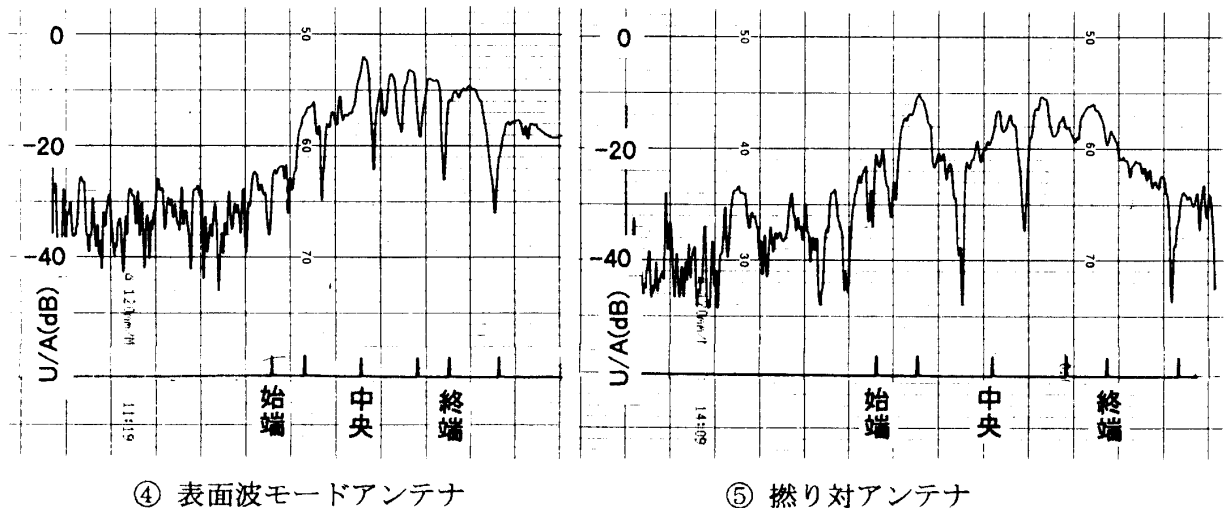


図 1.1 ケーブル状アンテナ使用時の歩行テスト

5. 結論

FM放送波を利用した侵入者検知の基礎実験を行った。放送電波は水平偏波であるため、立って歩く人間に対し本当にうまく動作するか不明であったが、実験結果からは次のことが言える。

水平偏波のダイポールアンテナやコリニアアレイアンテナの近傍界領域に 0.15 波長程度の横幅の人間が入ると受信ベクトルが変化し、ある程度の $U/A_0(\text{dB})$ の増加が生じる。垂直偏波を受信するアンテナやケーブル状アンテナを使用した場合、0.4~0.45 波長の身長の人体に放送波が当たって再輻射した電波を受信するためか検知域はやや広いが、水平偏波（放送波）を直接垂直偏波アンテナで受信する電波伝播路や、水平偏波が人間に当たって再輻射される垂直偏波が不安定であり、人間がいない時の $U/A_0(\text{dB})$ が大きく、また $U/A_0(\text{dB})$ の凹凸が見られる。

FM放送波を使って $U/A_0(\text{dB})$ が大きくなるシステムを作り上げることはできた。しかしながらこれを侵入者検知センサとするには、複数のダイポールアンテナやケーブル状アンテナをどのように配置するか、FM送信アンテナからセンサ設置場までのFM電波の伝播変動、センサ近くの建造物の影響など、種々の検討が必要である。

参考文献

1. 木谷博：”アンテナ間結合の変化を利用した物体検知”，福井工業大学研究紀要第27号（第一部）
2. K.Fujimoto, J.R.James：“Mobile Antenna Systems Handbook”，Artech House, Boston・London
3. 多湖紀之，ほか：“撚り対型漏洩ケーブルの開発”，住友電気第123号，昭和58年9月
4. 木谷博：“FM放送波を用いた物体検知の検討”平成10年度電気関係学会北陸支部連合大会 C-29

（平成11年12月6日受理）