

マイクロ波による鉄道踏切障害物 検知システムの実験

山下栄吉* 丸山信昭** 青木 茂***

鉄道踏切上の故障自動車をマイクロ波ビーム遮断現象を利用して検知し、大規模事故を防止する安全化システムを前回の論文(本誌Vol. 6, No.1)において提案した。ここでは実際の鉄道踏切について、この安全化システムを設計試作し、踏切上に設置し実験を行った結果を報告する。

Experiments of the Microwave Obstacle Detection System on Railroad Crossings

Eikichi YAMASHITA* Nobuaki MARUYAMA**
Shigeru AOKI***

A microwave system to detect cars broken down on railroad crossings for the prevention of large scale accidents was proposed in IATSS Review Vol. 6, No. 1. This is the report on the experiments and the results of this safety system set up at a railroad crossing.

1. まえがき

近年の自動車台数の急激な増加に伴い鉄道踏切事故数も増大している。事故防止対策の推進がされているが、自動車の大型化により踏切事故の規模も大きくなっている。

踏切を安全化するためには、踏切道内の異常物体を検知することが必要である。この手段として現在種々の方式があるが、光ビームまたは超音波ビームが物体により遮断される現象を利用した検知方式が一部の踏切で実用されている。

マイクロ波、つまり波長がセンチメートルからミリメートル程度の電磁波を用いても光や超音波と似た指向性ビームが得られる。マイクロ波を用いた踏切障害物検知システムについては前回の論文に述べた¹⁾。マイクロ波を用いたシステムでは、雨、雪、風などの影響を受けない安定な動作が可能と考えられる。また、偏波特性、アンテナ放射特性などの電磁波固有の性質を生かして特徴あるシステム設定ができる¹⁾。

今回は、前回の論文に提案したマイクロ波による鉄道踏切障害物の検知システムを指定電波の基準に合致するように設計し、鉄道踏切に設置して動作実験を行った結果を述べる。

2. 検知方式

2-1 検知方式の要点

詳細は前回の論文にあるが、改めて方式の要点を次にまとめておく。

- 1) 障害物がマイクロ波の伝搬を遮断する時の受信機入力の変化を検知して、鉄道保安装置に伝えることを基本原理とする。
- 2) 踏切面上の障害物位置に関する情報を得るために多数の電波ビームが必要であるが、アンテナからのマイクロ波放射パターンを扇形にすることにより送信機台数を最少限にとどめる。
- 3) 各マイクロ波ビーム間の干渉を防ぐために時分割放射と偏波面交叉放射を併用する。
- 4) 大規模踏切面については以上のビーム分離法を繰返して設定する。

2-2 検知方式の具体化

Fig. 1 に検知装置の系統図を示し、Fig. 2 に踏切道上のマイクロ波ビーム構成例を示す。Fig. 1 のようにマイクロ波送信機の出力は送信アンテナに送られ、指向性のある電波として受信アンテナに到達す

*電気通信大学教授 (マイクロ波工学)
Professor, University of Electro-Communications
**京浜急行電鉄(株)取締役・電気部長
Director, Keihinkyuko-dentetsu Co., Ltd.
***八幡電気産業(株)技術部長
Technical Manager, Yahata Electronic Co., Ltd.

る。送信アンテナと受信アンテナの間の伝搬路に自動車が入るとマイクロ波ビームが遮断され、受信機の入力レベルが低下し障害物の存在が検知される。障害物以外の原因、例えば、送信機の故障によっても障害物があるように動作するからフェイル・セーフシステムである。踏切道全面にわたって障害物を検知するために、マイクロ波ビーム数を数多く設置するので、各ビーム間の干渉による信号の混乱を防がなくてはならない。前述の時分割および偏波面交叉により分離したビームを交互に配置することでビーム間干渉を防げるので、マイクロ波は1波で済むことになる。

1) 時分割制御

近接する送信機は異なる時間にマイクロ波を放射する時分割変調を行うが、このためにはガン発振器の直接変調あるいは外部変調を用いる。この際、受信機は同期検波するが、受信回路は極めて簡単であり、送信周波数の変動があってもシステム動作に全く影響を与えないという特徴がある。

2) 偏波面交叉

時分割に加えて、電磁波の偏波交叉を利用してビーム間の干渉除去効果をさらに高める。この方法は送受信アンテナを90度傾けるだけでよく、装置の基本部分には特に変更を必要としないので、極めて簡単に実施できる。

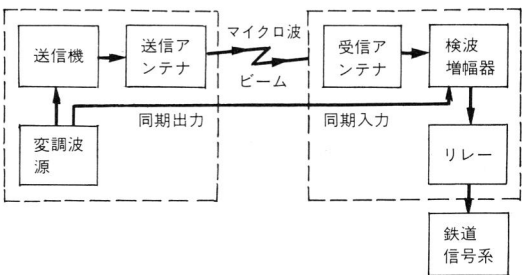


Fig. 1 障害物検知装置系統図
Obstacle detection system diagram

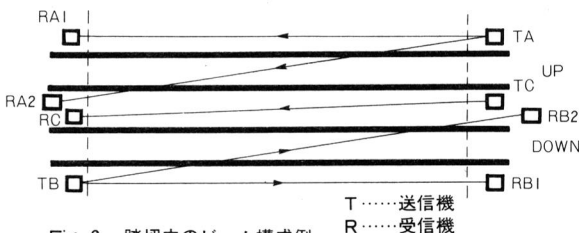


Fig. 2 踏切内のビーム構成例
Example design of beam distribution on railroad crossing

3. 実験用に試作した踏切障害物検知装置

京浜急行電鉄線の大師線産業道路駅近くの踏切に実験局3局(送信機3台、受信機5台)を設置する許可を郵政省から得た。マイクロ波周波数は24.218GHzから24.242GHzの間の1波で、放射最大電力は50mW以下と指定された。したがって、この指定値を満たすように次のような設計を進めた。

3-1 設計基準

障害物検知装置の性能を決定する主要事項は次の通りである。

- 1) 踏切規模から送受信アンテナ間の距離は50mとし、この間に障害物が入ればマイクロ波伝搬を遮断するように設計する。
- 2) 遮断する前のマイクロ波受信機における信号は雑音レベルより20dB程度高くとする。

これらの条件を満足するために、アンテナ指向特性を次のように定めた。

送信アンテナと受信アンテナの放射角をそれぞれ θ_T と θ_R とする。ここで簡単のために、 $\theta_T = \theta_R$ とすると、路面反射の影響を少なくするにはFig. 3のように設置する。ここでアンテナの高さ0.75mは、Fig. 4のような鉄道周囲の構造から定めている。この時、 $\theta_T = \theta_R \cong 3.5^\circ$ となるから、アンテナの垂直方向指向特性の電力半値幅を 3.5° にとることにする。

Fig. 4のアンテナ設置空間の大きさから、アンテナ直径を0.3m以上にはできない。一方、許可された周波数24GHzと $\theta_T = \theta_R = 3.5^\circ$ から、パラボラアンテナの直径を逆算すると0.25mとなり、上記の空間内に収まることが判る。

送信アンテナの水平方向指向角 θ_w は、Fig. 5に示すように、踏切の端部で軽乗用車(長さ3m)が1本以上のビームを遮断するように設定する。

したがって、電力半値幅6mとすると、 $L = 50m$

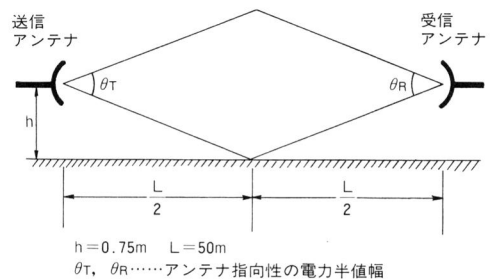


Fig. 3 踏切の構造によるアンテナ特性の決定
Design of antenna characteristics based on railroad crossing structure

の場合は $\theta_w \cong 7^\circ$ 、 $L = 20\text{m}$ の場合は $\theta_w \cong 20^\circ$ とすればよい。

アンテナ直径を25cmとし、マイクロ波放射時間2時間以下の場合の安全基準 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ をアンテナ面に適用すると、アンテナに給電する全電力は49mWとなる。人体はアンテナ面より離れているから、50mWを放射していても放射密度は $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ よりかなり低くなる。したがって、許可を受けている50mWの限界での電力を使用しても差し支えない。

各部分のマイクロ波電力レベルを推定するとTable

1のようになる。クリスタル検波器の最低感度を余裕をみて -30dBm とすると、 -17dBm の受信レベルは検知動作に十分な入力である。

Table 1 送信および受信電力レベル
Transmitter and receiver power level

送信出力	17dBm
送信アンテナ利得	30dB
伝搬基本損失(L=50m)	94dB
受信アンテナ利得	30dB
受信入力	-17dBm

3-2 試作装置の主要定数

前節の検討結果により次の実験用障害物検知装置を試作した。

1) 送信機

周波数 24.05~24.25GHz内の1波

電力 50mW以下

アンテナ パラボラ形、開口直径 0.254m

サイドローブレベル -15dB

水平方向電力半値幅 $8 \sim 12^\circ$

垂直方向電力半値幅 3.5°

発振素子 ガンダイオード

変調方式 ダイオードバイアス電圧の断続による時分割。繰返し周期1KHz。

ビーム・モード 各ビームにゲート時間および偏波面を指定する。

2) 受信機

周波数 24.05~24.25GHz

受信方式 同期検波

受信可能電力 -30dBm以下

アンテナ 開口直径 0.254m

サイドローブレベル -15dB以下

指向性はすべての方向に対し電力半値幅 3.5° 以下

検出出力 リレー接点の開閉とする。

3) その他

電源 AC100V (50Hz/60Hz)

構成 送信機3台、受信機5台

使用条件 温度 $-10^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 連続動作

踏切障害物検知実験局免許 八幡電気産業(株)

4. 実験結果

4-1 アンテナ特性

円形パラボラアンテナの一部を切り欠円形とすることにより、路面に水平方向および垂直方向について期待した扇形放射特性を得た。測定結果をまとめ

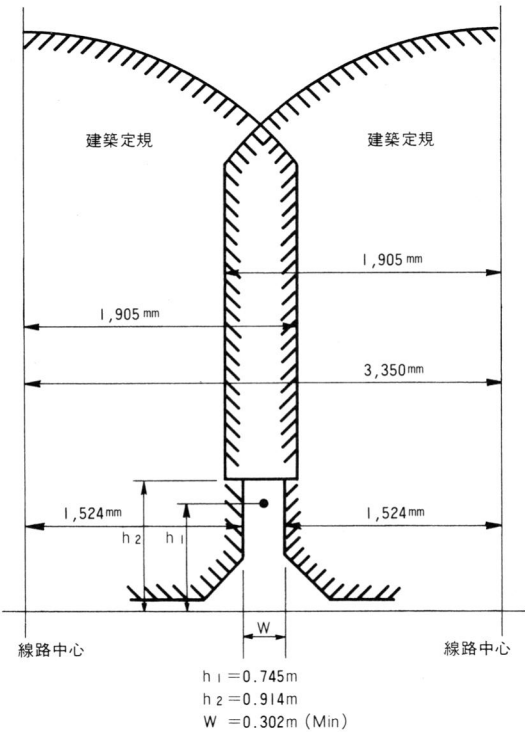


Fig. 4 マイクロ波アンテナ設置空間 (民鉄定規による)
Available space for setting microwave antennas

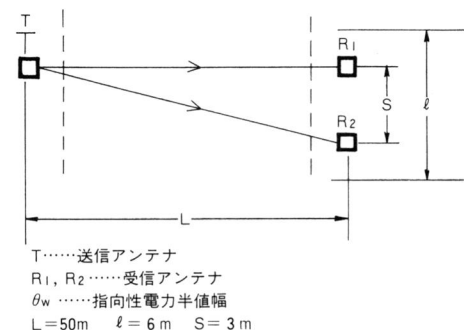


Fig. 5 送信アンテナ、扇形指向特性の決定
Design of the fan-shape directivity of transmitter antennas

るとTable 2 のようになる。サイドローブレベルはいずれの場合も約-20dBである。

踏切の状況において送信アンテナと受信アンテナを対向させ、水平偏波と垂直偏波による分離度を測定した結果をTable 3 に示す。この分離度があれば近接するビームの干渉を防ぐのに充分である。

Table 2 アンテナ指向特性 (電力半値幅)
Antenna directivity(half-power width)

		路面に垂直方向	路面に水平方向
送信 アンテナ	垂直偏波	3°	10°
	水平偏波	3°	10°
受信 アンテナ	垂直偏波	3°	3°
	水平偏波	3°	3°

Table 3 水平偏波と垂直偏波の分離度
Separation of horizontally polarized waves from vertically polarized waves

偏波の交叉角度	分離度
85°	32dB
90°	42dB
95°	32dB

4-2 連続動作時のレベル変動

屋外に送信機および受信機を設置し3か月にわたり受信レベルを記録した。晴天および雨天時の変動を含めても、受信レベル変動は1dBを越えなかった。1dBであってもシステム設計上の問題にはならない量である。

4-3 ビーム遮断特性

自動車マイクロ波ビーム中に入った場合について遮断特性を調べるため、Fig. 6のように小型乗用車を動かした。測定量は次の通りである。

- 1) ビーム中の自動車のアンテナからの距離(L1)を変えた時の遮断信号対雑音比。Fig. 7に測定結果を示す。
- 2) ビームに垂直に自動車を動かした時の遮断信号対雑音比。Fig. 8に測定結果を示す。

これらの測定結果からL=40mでも遮断信号対雑音比として20dB以上得られた。

5. 鉄道踏切における実験

前項は障害物検知システムとしての基本データを示したものである。この装置を実際の踏切に設置した時の特性を次に述べる。

5-1 装置の設置

京浜急行電鉄の大師線産業道路駅近くの踏切に送

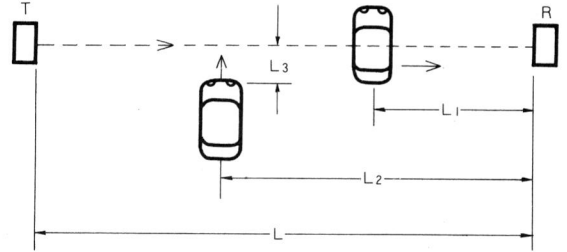


Fig. 6 軽自動車のビーム遮断特性測定
Measurement of beam cut-off characteristics of automobiles

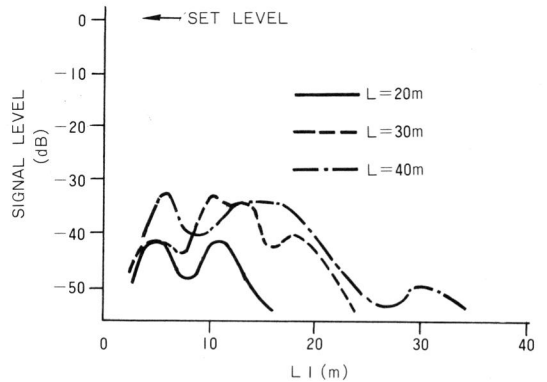


Fig. 7 軽自動車と受信アンテナとの距離(L1)に対する検知信号レベル(Fig. 6参照)
Recorded detection signal level against the distance(L1) between an automobile and a receiver antenna(c.f.Fig.6)

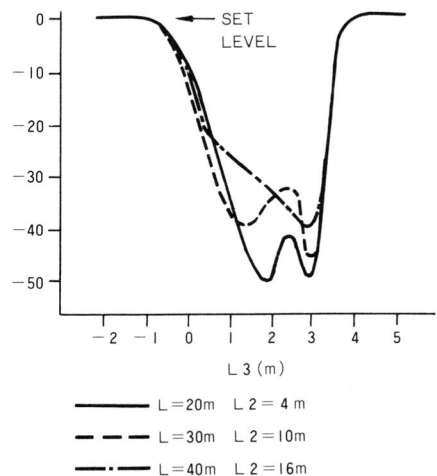


Fig. 8 軽自動車とビーム中心との距離(L3)に対する検知信号レベル(Fig. 6参照)
Recorded detection signal level against the distance(L3) between an automobile and the center of a beam(c.f.Fig.6)

信機3台と受信機3台をFig. 9、Table 4のように設置した。踏切幅が広く、ゆるく曲がっているため、

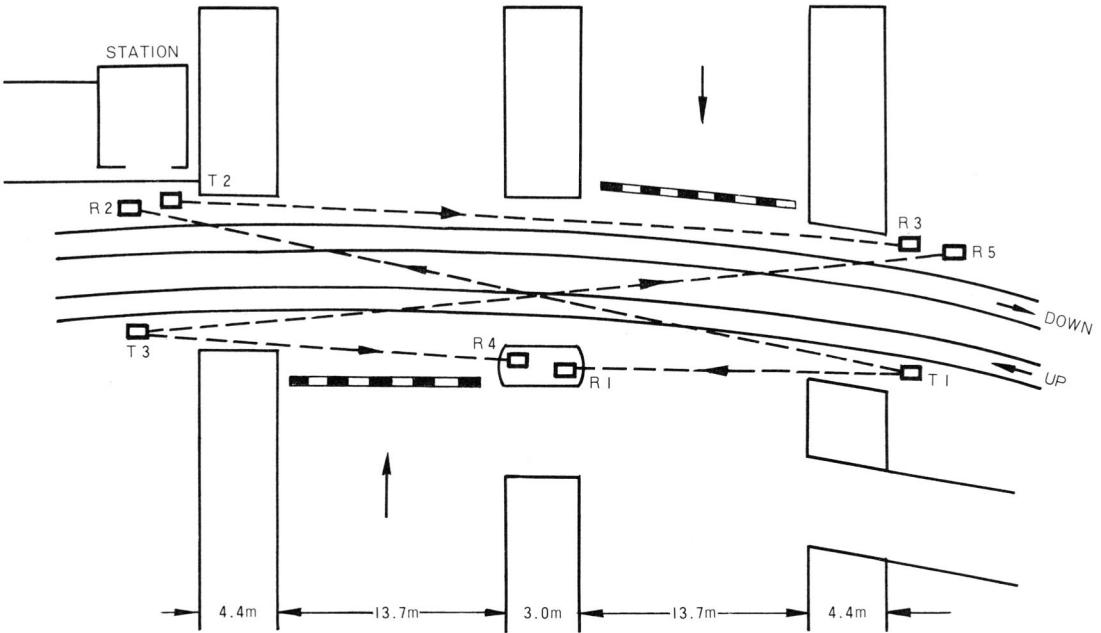


Fig. 9 産業道路駅踏切におけるマイクロ波ビーム系設置図
Designed microwave beam system on the railroad crossing near the Sangyo-doro Station

Table 4 産業道路駅踏切ビーム系動作モード
Performance modes of the beam system on the railroad crossing near the Sangyo-doro Station

ビーム系	距離	時分割チャンネル	偏波	電力半値幅	
				垂直	水平
T1 → R1	20m	1	垂直	3.5°	10°
T1 → R2	46m	1	垂直	3.5°	10°
T2 → R3	43m	2	垂直	3.5°	10°
T3 → R4	21m	1	水平	3.5°	10°
T3 → R5	46m	1	水平	3.5°	10°

Table 5 送信出力20mWに対する各受信機電力レベル(dBm)
Each receiver power level(dBm) against transmitter output 20mW

受信機	送信機からの距離	受信電力入力	検波信号出力	検波信号内雑音
R1	20m	-16	0	-50
R2	46m	-16	0	-50
R3	43m	-18	0	-48
R4	21m	—	0	-51
R5	46m	—	0	-50

Table 6 各受信機に入る洩れマイクロ波電力(dBm)
Leaked microwave power to each receiver(dBm)

	R1	R2	R3	R4	R5
T1のみ送信	—	—	-43	-45	-48
T2のみ送信	-50	-45	—	-48	-47
T3のみ送信	-49	-54	-45	—	—

マイクロ波ビームの構成は Fig.2 といくぶん異なるが、時分割および交叉偏波による干渉の分離法の特徴を生かしてある。

5-2 遮断信号レベルおよび雑音レベル

各ビームの受信レベルおよび遮断時の雑音レベルを Table 5 に示す。いずれの受信機出力の雑音レベルも信号レベルに対し50dB以上低いので、外来雑音が検知システムに影響することはないと考えられる。

5-3 検知ビーム相互の干渉

送信機3台を個別に動作させ、対向する受信機以外の受信機に入る洩れマイクロ波の受信レベルを調べた。Table 6 の測定結果を見ると、直接の洩れによ

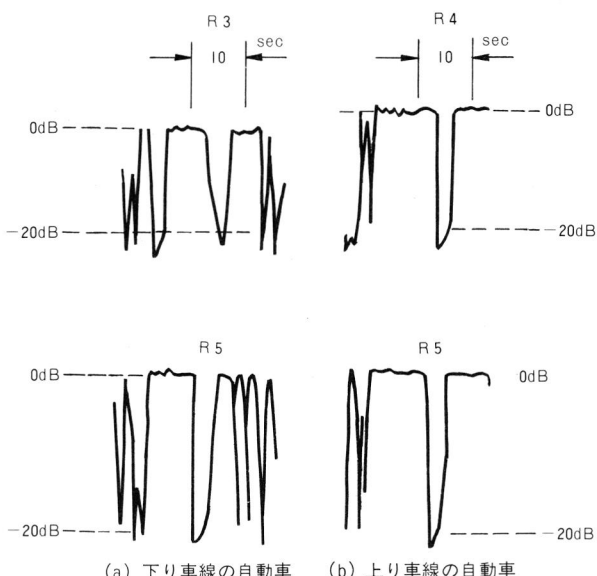
る干渉は十分に小さいことが判る。

踏切道を通る自動車の位置によってはマイクロ波ビームを反射する。異なる偏波の2つのビーム系について反射波の受信レベルを測定した結果40dB以上も低いところにあり、このような間接的干渉も

問題ないことが判明した。

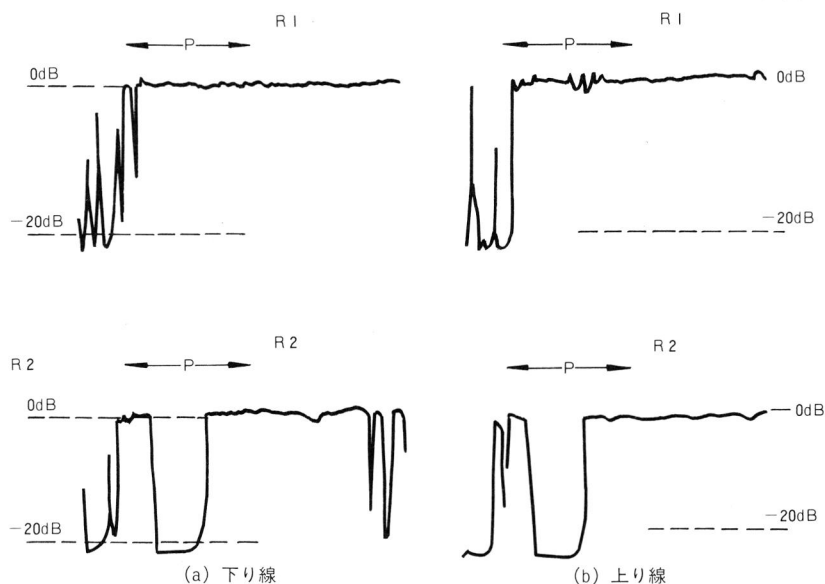
5-4 踏切における自動車の検知

踏切を通過する際に各受信機が検知するマイクロ波のレベルを記録計により記録した。Fig. 10に上り車線および下り車線の自動車による遮断記録の例を示す。遮断による受信レベル変化は30 dB以上に達しているため、自動車検知は確実にを行うことができることが判った。



(a) 下り車線の自動車 (b) 上り車線の自動車

Fig. 10 検知信号の例
Example of detection signals



(a) 下り線 (b) 上り線

Fig. 11 電車通過時間(P)中の検知信号変化
Variation of detection signals during the passage time(P) of a train

5-5 電車による検知レベル変化

電車が通過することにより、自動車検知信号のレベルはFig. 11のように変動した。また、電車によりビームが遮断される効果を測定してみたところ30dB以上あった。しかし、電車の踏切通過時間中には検知出力が接続されないようあらかじめセットしてあるので運用上の問題はない。

マイクロ波が放射されるのは踏切に列車が接近して踏切警報装置が鳴動し始める時から、列車が踏切を通過し終る時までである。

6. 結論

マイクロ波を用いたこの鉄道踏切障害物検知システムは十分に実用的であることが認められた。このシステムでは、送信機台数を最小限度にとどめるため、扇形放射ビームを用いることが特徴であるが、自動車の検知にこの扇形放射ビームが有効に働くことが判明した。複数の自動車の通過によるマイクロ波反射、回折からビーム間の干渉が生じることはなかった。

実験した踏切環境においてマイクロ波帯の雑音は低く、当初予測した信号対雑音比よりも良好な結果が得られた。路面によるマイクロ波反射の影響はアンテナ指向性の適切な設計により除くことができた。

マイクロ波の偏波面によるビーム遮断効果の差は認められなかったため、このシステムにおけるビーム間干渉の偏波面交叉による除去法は有効であった。

この障害物検知システムの実験は昭和49年5月から2年間と、昭和52年4月から2年間の合計4年間にわたって京浜急行電鉄・産業道路駅踏切において行ったが、誤動作が一度も発生せず、安定で信頼度の高いシステムであることが実証された。

参考文献

- 1) 山下栄吉：マイクロ波による鉄道踏切障害物の検知システム，国際交通安全学会誌，Vol.6, No.1, pp. 50～54, 昭和55年3月