アダプティブキャンセラ方式による同時送受信技術の実験的検討

学生員 阿部 精順 (筑波大)

正 員 渡辺 秀明 (防衛庁)

非会員 平澤 一紘 (筑波大)

Simultaneous Transmission and Reception System by Adaptive Cancelling

Kiyonobu Abe, Student Member (University of Tsukuba), Hideaki Watanabe, Member (Japan Defence Agency),

Kazuhiro Hirasawa, Non-Member (University of Tsukuba)

Airborne and shipborne radar, communication and the related radio wave systems with simultaneous transmission and reception system (STR) have limited spatial interval between the transmitting and the receiving antenna. Thus suppression of self-interference due to the strong transmitted signal is an important problem. We have made an engineering model of STR with an adaptive cancellation technique, and evaluated for three kinds of interferences: CW, pulse, wideband signals.

キーワード：適応ノイズキャンセラ，アダプティブフィルタ

1. まえがき

一般に、艦船及び航空機では、レーダ、通信機器等の電波器材を搭載する際、搭載スペースに制限があるため、各装置の空中線を離隔することが困難となる。このため、複数の電波器材が近接した周波数で送受信を行うと送信波の回り込みにより、他の電波機器において目標信号の検出が妨害される場合がある。現状では、送信と受信の時間帯を分けて、時分割で送受信を行うようになっている。しかし、時分割の送受信では、送信及び受信の効率が劣化することから、レーダにおいては目標の探知・追尾、電波探知機器等においては目標信号の監視に支障をきたすことがある。従って、近接した周波数を用いて同時に送受信を行う場合、干渉波（送信波の受信空中線への回り込み）を抑圧・除去し、目標波（対象目標からの受信波）のみを検出することは重要な課題である⁽¹⁾。このような干渉波を抑圧する方法として他に、位相相殺回路によって送信電力の受信機への回り込みを除去する方法等⁽¹⁾や送受信空中線の偏波方向を変化させることにより、送受信空中線のアイソレーションをとる方法⁽²⁾などがあげられる。

一方、信号処理技術の発展に伴い、アダプティブキャンセラ方式⁽³⁾⁽⁴⁾が各種レーダのクラッタ及び妨害波の低減化に利用されてきており、最近の研究では、この方式が同時送受信を行うシステムに応用され、その有効性が報告されている^{(5)~(7)}。

このようなことから、我々は、近接した送受信空中線間において、干渉波を抑圧しながら目標波を検出する目的で、同時送受信実験装置（以下「本装置」）を試作し、アダプ

ティブキャンセラ方式による干渉波の抑圧効果について確認をしてきた^{(8)~(11)}。本論文では適応ノイズキャンセラ方式⁽¹²⁾を用いて、その効果について実験を主体として確認した結果を述べる。

なお、干渉波の抑圧・除去手法として現実の運用を考慮したときに、電波機器を改造して信号発生部からの信号を取り出し、直接参照信号として用いることができる場合と電波機器の改造が困難であり、信号発生部からの信号を直接取り出せない場合に、送信空中線の近傍に空中線を設置し、ここからの信号を参照信号とする2つの場合について検討をする。

本論文では、第2節で本装置の基本構成及び動作原理、第3節で実験方法、第4節で実験結果及び考察について述べる。

2. 同時送受信実験装置の構成及び動作原理

<2.1> 基本構成 本装置の構成を図1に示す。本装置は、信号発生部、送信部、受信部、信号処理部、受信及び送信空中線から構成されており、CW、パルス等の各種信号を用いた実験が可能である。本装置では、信号発生部において、信号を発生させ、送信部を通して電波を放射する。次に受信空中線では目標波と干渉波（送信空中線からの回り込み）を取り込み、受信部でIF帯に変換された後、AD変換器でデジタル信号に変換され、信号処理部において、信号発生部からの参照信号を基に干渉波の除去処理を行うようになっている。信号処理部では、AD変換器から送られてくるデジタル信号を一旦、記憶装置に蓄え、オフラインで信号処理を行う。

図1 同時送受信実験装置の基本構成
Fig. 1. Fundamental configuration of the STR system

<2.2>干渉波抑圧の方法 干渉波の抑圧方法としては、適応ノイズキャンセラ方式を用いている。本方式は、アダプティブフィルタを用いて、未知伝搬系のレプリカを作成することにより、干渉波を除去する信号処理方式である。

サンプリング時刻 kT_s ($k=0,1,2,\dots$ はサンプル番号、 T_s はサンプル周期)における信号発生部からの参照信号ベクトルを $x(k)$ 、アダプティブフィルタの荷重ベクトルを $w(k)$ とし、目標波の信号を $s(k)$ 、干渉波の信号を $i(k)$ とすると受信部における受信信号は $d(k)=s(k)+i(k)$ となる。また、消え残り誤差信号 $e(k)$ は、

$$e(k)=d(k)-w(k)^T x(k) \quad (1)$$

となる。 T は行列の転置を表す。ここでアダプティブフィルタのタップ数を N とすると、 $w(k)$ 及び $x(k)$ は、

$$w(k)=(w_1(k), w_2(k), \dots, w_N(k))^T \quad (2)$$

$$x(k)=(x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1))^T \quad (3)$$

である。このとき、干渉波と目標波は、相関が弱いものとすると、 $e(k)$ の期待値 $E[e(k)]$ を最小にする最適荷重 w_{opt} は、次のように表される。

$$w_{opt}=R^{-1}p \quad (4)$$

ここで、 $R=E[x(k)x(k)^T]$ は $x(k)$ の自己相関行列、 $p=E[d(k)^* x(k)]$ は $d(k)$ と $x(k)$ の相互相関ベクトルである。ただし、 $*$ は複素共役を表す。この w_{opt} を用いることにより受信信号 $d(k)$ に含まれる干渉波成分 $i(k)$ が最適に推定されるため、 $e(k)$ 中の干渉波成分の電力は最小となる。

3. 実験方法

本装置の性能を確認するため、電波暗室内で実際に送受信実験を行った。実験の諸元を表1に、測定系統のブロックを図2に示す。目標波は、標準信号発生器により発生し、空中線から空間に送信され、送信波(干渉波)は、信号発生器により発生し、変調部により、変調され空間に送信される。目標波を送信する空中線は、ホーンアンテナで受信空中線の正面方向から、5m離れた位置に置き、干渉波を送信する空中線もまたホーンアンテナで、30度の方向に0.7m離れた位置に設置した。また、送信波の信号を参照

表1 実験の諸元

Table 1. Configuration of the STR system

目標波周波数	9500.1MHz
送信波(干渉波)周波数	9500.0MHz
局部発振器周波数	9490.0MHz
送信波/目標波比	20dB (受信部入力端、帯域50MHz)

信号として直接用いない場合には、送信空中線の近傍に参照信号を取り入れる空中線を設置し、そこからの信号を参照信号とした。なお、参照信号用空中線の送信波と目標波の比は20dBとした。

受信空中線で受信された信号は、受信部でIF帯にダウンコンバートされた後、サンプリング周波数100MHz、量子化ビット数10ビットでAD変換され、デジタル信号として記録される。信号処理部では、記録された信号の干渉波抑圧処理及び各種の解析を行えるようになっている。

また、本装置は、第2節でも紹介したようにCW、パルス等各種信号を用いた実験が可能となっているが、今回は基礎的な干渉波抑圧のデータを得るため、目標波については、CW、干渉波については、CW、パルス(パルス繰返周期60 μ s、パルス幅20 μ s)、ノイズFM変調をした広帯域信号(帯域10MHz)とした。

図2 同時送受信実験装置の測定系統図
Fig. 2. Experimental apparatus of the STR system

4. 実験結果及び考察

<4.1>参照信号を直接信号発生部からとった場合 目標波がCW、干渉波がCWの場合の抑圧処理前と抑圧処理後の受信信号をフーリエ変換した結果を図3に示す。なお、干渉波及び目標波のレベルの測定は、周波数分解能を6.1kHzの帯域幅で測定をしている。また、アダプティブフィルタの時間遅延は、サンプリング周期と同じ10ns、タップ数は15とした。

干渉波がCWの場合、抑圧処理前後で目標波の損失がほとんどない。干渉波はノイズレベルにまで落ち込んでおり、抑圧度が高いことが観測される。アダプティブフィルタは、単一の周波数に対しては周波数的にシャープなノッ

図3 干渉波がCWの場合
Fig. 3. Experimental results
(Interference: CW, Target: CW)

図5 干渉波が広帯域信号の場合
Fig. 5. Experimental results
(Interference: wideband, Target: CW)

図4 干渉波がパルスの場合
Fig. 4. Experimental results
(Interference: pulse, Target: CW)

チフィルタを形成できるためと考えられる。

干渉波がパルスの場合を図4に示す。干渉波がパルスの場合にも目標波の損失は、ほとんどなかった。干渉波の抑圧については、干渉波がCWのときに比べ、干渉波の抑圧度が劣化した。これは、干渉波がパルスであるため、干渉波の帯域が広がっているためである。

干渉波が広帯域信号の結果を図5に示す。この図は、帯域が広帯域であることを示すため、横軸が0～20MHzとなっている。干渉波が広帯域信号である場合にも、目標波の損失はほとんど無かった。干渉波がCWのときほど、大きく抑圧はしていないが、干渉波の抑圧は広帯域に抑圧している。広帯域信号の場合あらゆる周波数成分を満遍なく持っているため、広帯域に学習ができ、アダプティブフィルタで広帯域に未知伝搬系を模擬することができるためであると考えられる。

＜4.2＞参照信号を空間からとった場合 参照信号を送信空中線の近傍に置いた空中線からの信号とした場合の結果を図6～8に示す。それぞれ干渉波がCW、パルス、広帯域信号である。すべてに共通していることであるが、参照信号に目標波成分が含まれており、参照信号が目標波と相関があるため、目標波に損失がみられる。また、干渉波がCWの場合、干渉波成分の消え残りも大きくなり、性能の劣化が大きい、これは直接信号発生器からの信号

図6 干渉波がCWの場合
Fig. 6. Experimental results
(Interference: CW, Target: CW)

図8 干渉波が広帯域信号の場合
Fig. 8. Experimental results
(Interference: wideband, Target: CW)

を参照信号とした場合、単一のCW信号であるが、空間からの信号を参照信号とすると単一の周波数ではなくなるため、それだけ帯域が広がるため抑圧度が低くなると考えられる。

<4.3>S/I改善度 ここで、IMF (IMprovement Factor: S/I改善度)を以下のように定義し、タップ数による変化を図9に示した。

$$S/I改善度 (IMF) = \frac{S_{OUT}/I_{OUT}}{S_{IN}/I_{IN}}$$

I_{IN} : 送信波(干渉波)の入力レベル
 S_{IN} : 目標波の入力レベル
 I_{OUT} : 処理後の送信波(干渉波)レベル
 S_{OUT} : 処理後の目標波レベル

干渉波がCWの場合、IMFは65dB以上と高く、タップ数による変化はほとんど見られない。これは、単一周波数の干渉波は、フィルタのタップが一つでも十分抑圧できることを示している。

干渉波がパルスの場合、タップ数による改善度に変化がほとんど見られないのは、アダプティブフィルタの働きがCWを抑圧する働きと同一になっているため、広帯域に抑

図7 干渉波がパルスの場合
Fig. 7. Experimental results
(Interference: pulse, Target: CW)

圧できないためと考えられる。

参照信号を信号発生器から直接とったときに、干渉波が広帯域信号の場合、タップ数の増加とともに IMF が改善されている。これはアダプティブフィルタが単一のタップでは単一周波数の干渉波にしか対応できないが、タップを増加することで対応できる周波数が増大し、広帯域化することを意味している。ただし、タップ数は多ければ多いほど IMF が向上するわけではなく扱う信号により、最適なタップ数があると考えられる。

また、参照信号を空間から取り込んだ場合には、空間的なフィルタを形成でき、アダプティブアレーの動作が可能となる。そのため IF 帯での信号処理よりも、RF 帯での空間フィルタの帯域が広い場合、タップ数が少ない場合でも広帯域な抑圧ができることを意味している。

図9 タップ数による変化
Fig. 9. Improvement factor (IMF) vs. tap number

5. むすび

送受信空中線間のアイソレーションを信号処理により確保する方法について解析を行うため、同時送受信実験装置を試作し、アダプティブキャンセラ方式について、各干渉波 (CW, パルス, 広帯域信号) の抑圧度を調べた。その結果、CW 信号では 60 数 dB の干渉波の抑圧ができ、干渉波抑圧の一手法として有効であることが実験的に確認できた。実際のレーダ等に応用する場合、レーダの送受信空中線を分離した形態を想定し、送信電力を 70dBm とし、最小受信感度を -80dBm としたときに、送信電力がそのまま受信機に入力されると考えるとそのアイソレーションは 150dBm 以上必要となる。そのため、現実的には、送受信空中線間のアイソレーションをとるために、アンテナの配置、電波吸収体の利用などを含めて信号処理による干渉波の抑圧を考える必要がある。

今後は、他の方式や方式の組み合わせを考慮した実験を行うとともに、手法のリアルタイム化及びコヒーレントな信号や時変的な信号にも対応可能な、同時送受信を検討す

る予定である。また、実際のレーダ等の電波機器に適用した実験を行う必要がある。

最後に、本研究における実験に御協力を頂いた防衛庁技術研究本部第2研究所電波第2研究室の島野不二郎技官に感謝致します。

(平成8年7月25日受付, 平成8年12月6日再受付)

参考文献

- (1) Van Brunt, L. B. : Applied ECM, Electronic Warfare Engineering, pp.262-276, 1978
- (2) 橋本・請川 : 「送受信アイソレーション向上に関する基礎的検討」, 日本航空宇宙学会誌, 41, 477, pp.597-599 (1993-10)
- (3) 近藤・大橋・実森 : 「計測・センサにおけるデジタル信号処理」, 昭晃堂, (1993)
- (4) S. Haykin (武部幹訳) : 「適応フィルタ入門」, 現代工学社, (1987)
- (5) M. E. Brown: "Interference Cancellation in RF Signals Using Adaptive Array Techniques", Master Thesis, Air Force Inst. of Tech., Wright-Patterson AFB, OH, (1990).
- (6) Raytheon Co., Electromagnetics Systems Div., "Adaptive Cancellation Techniques", Naval Research Laboratory, Washington DC, AD-A136946, (1983).
- (7) 大室・大橋・立花・近藤 : 「サイドローブ・キャンセラにおける信号処理方式の比較検討」, 信学技報, SANE82-2, (1982)
- (8) 阿部・米倉・渡辺・平澤 : 「レーダ応用のための同時送受信技術について」, 信学技報, SANE94-58 (1994)
- (9) H. Watanabe, K. Abe and T. Nakazawa: "Simultaneous Transmission and Reception System", Proc. the ISNCR-94, pp.247-252 (Nov. 1994)
- (10) 渡辺・阿部・米倉・小林・伊藤・近岡・保科・岡村 : 「ニアフィールドでの干渉波を抑圧するナルビーム形成」, 信学技報, SANE94-89 (1995)
- (11) 米倉・渡辺・阿部・保科・岡村 : 「同時送受信のパルスドップラーへの応用」, 信学技報, SANE95-82 (1995)
- (12) B. Widrow, J. R. Glover., J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler, E. Dong and R. C. Goodlin: "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications", Proc. IEEE, 63, 12, pp.1692-1716 (Dec. 1975)

阿部 精順

(学生員) 1983年筑波大学第3学群基礎工学類卒業。85年同大学大学院工学研究科修士課程修了。86年防衛庁技術研究本部入庁, 第2研究所に配属。現在, 筑波大学大学院工学研究科博士課程に在学中。これまでレーダ信号処理及びその関連分野の研究に従事。電子情報通信学会会員。

渡辺 秀明

(正員) 1977年慶応大学工学部卒業。79年同大学大学院修士課程終了。同年防衛庁技術研究本部入庁, 現在に至る。工学博士。これまでレーダ信号処理及びその関連分野の研究に従事。電子情報通信学会会員。

平澤 一紘

(非会員) 1964年慶応大学工学部卒業。71年Syracuse大学大学院修了(Ph.D)。同大学勤務, 自営コンサルタントを経て, 現在, 筑波大学電子・情報工学系教授。電波の放射・散乱の制御, フェーズドアレー, 移動通信用アンテナ, アダプティブアレーの研究に従事。電子情報通信学会, テレビジョン学会会員。