

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.026

基于时间反演的无线通信系统仿真及探测信号选择^{*}

李宏博^{**}, 陈长兴
(空军工程大学 理学院, 西安 710051)

摘 要:为改善无线通信系统抗干扰性能,将目前广泛应用于水声通信、超声波探测等领域的时间反演技术移植至无线通信系统,在介绍基本原理的基础上建立了基于被动式时间反转镜的单阵元无线通信系统模型,通过理论分析讨论了系统聚焦增益,通过计算机仿真研究了收发信号的波形特点、分析论证了三种典型探测信号对接收波形的影响,并得出了相关结论。仿真结果表明,给定信道条件下,系统性能主要取决于探测信号的选择。基于仿真结果和分析,对探测信号的选择给出了更清晰的一般性原则,为实际通信系统性能的提高提供了科学依据。

关键词:无线通信;时间反演;时间反转镜;系统仿真;探测信号

中图分类号:TN925 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0800-07

Simulation of a Wireless Communication System Based on Time Reversal Processing and Pilot Signal Choosing

LI Hong-bo, CHEN Chang-xing
(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract:To enhance the anti-interference capability of a wireless communication system, Time Reversal (TR) technology which has been widely used in fields such as underwater acoustic and ultrasonic defectoscope is transplanted to a wireless communication system. On the basis of discussing the principle of Time Reversal Mirror (PTRM), a wireless communication model employing the single sensor passive time reversal mirror (PTRM) is constructed as well as the focusing gain of the model is calculated mathematically. Both the waveforms of transmitted signals and those of the received signals are compared and studied by computer simulations in which 3 typical pilot signals are employed and their different effects on received waveforms are also analyzed in detail. Simulation results show that, given certain communication channel conditions, system performance depends heavily on pilot signal. According to the simulation results and analysis, this paper proposes clearer general principles for pilot signal choosing, which may provide helpful and scientific support for the performance enhancement of a practical communication system.

Key words:wireless communication;time reversal;time reversal mirror;system simulation;pilot signal

1 引 言

时间反转镜(Time Reversal Mirror, TRM)技术,又称时间反演(Time Reversal, TR)技术,起源于光学中

的相位共轭。1992 年, M. Fink 将 TR 技术应用于声学成像领域^[1]。其基本原理是利用声波传输过程中,声源和接收点间的互易性,使声波能在均匀、非均匀介质中实现时间和空间的同步聚焦,用于复杂

^{*} 收稿日期:2012-11-28;修回日期:2013-04-03 Received date:2012-11-28;Revised date:2013-04-03
基金项目:航空科学基金资助项目(20110196004)
Foundation Item: Aerospace Science Funds Project(20110196004)
^{**} 通讯作者:lihongbo7909@163.com Corresponding author: lihongbo7909@163.com

介质中目标的探测。近年来,TR 技术在超声波探
癌、水下声波通信等方面得到了广泛应用,取得了大
量理论和实际应用研究成果^[2-5]。TR 技术于 2004
年左右被引入电磁波领域^[6],在无线通信中的应
用尚处于起步阶段^[7-10]。

从国内情况看,基于 TR 技术的通信研究主要
集中于水声通信领域^[11-16],在无线通信领域除电
子科技大学开展了相关研究^[17-18]外,鲜见公开文
献报道。文献[17-18]通过构建实验室多径环境,
从实证角度研究了基于 TR 技术的无线通信系统性
能,类似于国外早期将 TR 应用于超声波、水声通信
领域所做的实验。水声通信领域的研究^[11-16]多集
中于仿真和实验,通过论证信道等效冲激响应特性
来研究系统性能。文献[13]将被动 TRM 应用于水
声通信系统,通过仿真研究了信道等效冲激响应特
性,通过实验给出了收、发信号的波形,定性说明了
探测信号的选择原则,但对不同探测信号对系统性
能的影响未做讨论。

本文将被动 TRM 引入无线通信系统,所做探索
性工作如下:第一,将被动 TRM 引入无线通信系统
并建立了模型,基于此模型通过仿真给出了原始收
发波形,便于直观研究系统性能;第二,指出了已有
文献在推导接收信号形式时存在的局限,讨论了这
种局限对探测信号选择的影响;第三,通过仿真研究
了三种不同探测信号对系统性能的影响,从实际应
用角度对探测信号的选择给出了更明确的原则。

2 TR 基本原理

TR 技术之所以能引起如此多的关注,在于其特
有的时间、空间聚焦特性。时间反演本质上是对时
域信号的逆序操作,将信号在时序上进行反转,等效
于频域相位共轭。形成的时间反演信号具有时间压
缩和空间聚焦的特性,即空时聚焦特性。时间聚焦
是指复杂媒质中多径传输的多径时间反演信号最大
能量会在同一时间到达接收天线,实现时间上的能
量聚焦,可有效抵抗一般系统中显著影响传输性能
的非均匀复杂环境或媒质引起的信号多径延迟衰
减。空间聚焦是指时间反演信号可在没有任何对接
收天线先验知识的情况下,自适应地传输到接收天
线,实现空间上的能量聚焦。目前已有大量文献对
TR 技术的基本原理进行了论述,文献[17]对 TR 技
术的时空聚焦特性进行了数学证明,限于篇幅,本文

不再赘述。

3 基于单阵元被动时间反转镜的无线通信系统

时间反转镜按照收、发端阵元(天线)数量可分为
基阵 TRM 和单阵元 TRM,按照各阵元是否需要收发
合置可分为主动式 TRM、被动式 TRM,按照时间反转
镜实现的方法不同分为常规 TRM 和虚拟 TRM。基阵
时间反转镜要求通信节点收发合置,节点设备复杂,
而单阵元则简化了设备复杂性,适用于追求节点简单
的低功耗通信场合,而被动时间反转镜则可在信息单
向传输下实现信号的时间反演和信道匹配。

3.1 系统模型

基于单节点时间反转镜的典型通信系统如图 1
所示,信源在发送信号 $s(t)$ 之前,先发送探测信号
 $p(t)$,将接收到的探测信号进行时间反演,构造一个
前置预处理器来实现被动时间反转处理。

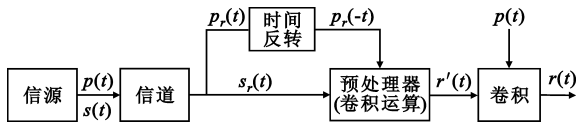


图 1 被动时间反转镜实现框图
Fig.1 The block diagram of the passive time reversal mirror

接收到的探测信号 $p_r(t)$ 和发射信号 $s_r(t)$ 可分
别表示为

$$\begin{cases} p_r(t) = p(t) * h(t) + n_p(t) \\ s_r(t) = s(t) * h(t) + n_s(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $n_p(t)$ 、 $n_s(t)$ 分别为叠加的本地干扰噪声;
 $h(t)$ 为多径信道的冲激响应函数,总的接收信号是
通过接收点的所有沿不同途径、不同时刻到达信号
的干涉叠加。

将 $p_r(t)$ 时序反转得到 $p_r(-t)$,存储它作为预
处理器的系统函数,将 $s_r(t)$ 经过预处理器,输出为
 $r'(t) = s_r(t) * p_r(-t) =$

$$\begin{aligned} & [s(t) * h(t) + n_s(t)] * \\ & [p(-t) * h(-t) + n_p(-t)] = \\ & s(t) * p(-t) * h(t) * h(-t) + n(t) \end{aligned} \quad (2)$$

文献[13]指出: $h(t) * h(-t)$ 为无线信道冲激
响应的自相关函数,通常称为时反信道,这相当于在
时间上把接收到的多径扩展信号进行了压缩和同相
叠加,显然其相关峰明显高于旁瓣,可近似视为 δ

函数。 $n(t) = s(t) * h(t) * n_p(-t) + p(-t) * h(-t) * n_s(t) + n_s(t) * n_p(-t)$ 为噪声干扰项, 此时消除了信道的多径扩展干扰, 但引入了探测信号的信息, 消除办法是将预处理器输出与 $p(t)$ 作卷积运算, 输出为

$$\begin{aligned} r(t) &= r'(t) * p(t) = \\ &= s(t) * p(-t) * p(t) * h(t) * h(-t) + \\ &= n(t) * p(t) \approx \\ &= s(t) * p(-t) * p(t) * \delta(t) \end{aligned} \quad (3)$$

由上式知, 若探测信号具有良好的自相关特性, 即 $p(-t) * p(t) \approx \delta(t)$, 则最终接收信号 $r(t)$ 将与发送信号 $s(t)$ 近似相等。

由式(2)、(3)可知, 文献[13]推导接收信号与发送信号的关系基于两个假设: 第一, 信道的冲激响应 $h(t)$ 和探测信号的自相关函数主瓣明显高于旁瓣, 即 $h(t) * h(-t) \approx \delta(t)$ 和 $p(-t) * p(t) \approx \delta(t)$; 第二, $n(t) = s(t) * h(t) * n_p(-t) + p(-t) * h(-t) * n_s(t) + n_s(t) * n_p(-t)$ 和 $n(t) * p(t)$ 均可看作非相干叠加的噪声干扰, 可不予考虑。采取这样的假设和近似来阐述 TR 技术的基本原理是可行的, 文献[18]就是基于以上两个假设来论证 TR 技术的时空聚焦特性。

事实上, 以上假设有其局限性: 第一, 一个信道的冲激响应 $h(t)$ 的自相关函数 $h(t) * h(-t)$ 必然有较大的主瓣, 但其旁瓣则不一定可以忽略, 这与信道的实时物理状态有关且不可人为控制, 这必然影响系统性能; 第二, $p(-t) * p(t) \approx \delta(t)$ 的成立是有条件的, 即选择了合适的探测信号; 第三, 式(2)与式(3)中的噪声项对于系统性能是有影响的, 特别是在低信噪比条件下, 噪声对于系统性能的影响不可忽略; 第四, 以 $p(-t) * p(t)$ 是否与 δ 函数相近似为依据来选择探测信号不够全面, 给定其他条件时自相关性能最优的探测信号未必会使系统性能最优, 特别是在低信噪比情况下, 其根源即在于式(3)中忽略的噪声项。关于后面两点, 后续仿真将详细分析说明。

综上所述, 被动时间反转镜是利用了信道冲激响应、探测信号自相关峰尖锐的特性, 使最终接收信号近似为发送信号与两个 δ 函数的卷积, 进而使最终接收信号波形与最初发送波形保持较好的一致性。要完美地实现这一过程, 必须尽量满足 $h(t) *$

$h(-t) \approx \delta(t)$ 和 $p(-t) * p(t) \approx \delta(t)$, 信道冲激响应的自相关性与信道的实时物理状态有关, 因此选择合适的探测信号 $p(t)$ 是保证系统性能良好的关键因素之一, 但选择标准不是单单满足 $p(-t) * p(t) \approx \delta(t)$ 即可。

3.2 系统聚焦增益分析

设经信道传播后, 接收到的探测信号 $p_r(t)$ 是 N 个具有不同幅度 A_i 、延时 τ_i 的多径信号的干涉叠加, 假定各多径噪声分量独立, 则 $p_r(t)$ 可表示为

$$p_r(t) = \sum_{i=1}^N [A_i p(t - \tau_i) + n_i(t)] \quad (4)$$

被动式时间反转信号单向传输, 经时间反转后, 各多径信号同时同相叠加, 则 TRM 处理后信号输出可表示为

$$r(t) = \sum_{i=1}^N A_i p(t) + \sum_{i=1}^N n_i(t) \quad (5)$$

其信噪比为

$$SNR_2 = \left(\sum_{i=1}^N A_i \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \right) \quad (6)$$

假定各多径信号的信噪比相同, 即

$$SNR_1 = \frac{A_i^2}{\sigma_i^2}, i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中 σ_i^2 为第 i 条多径分量 $n_i(t)$ 的方差。则

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^N \frac{A_i^2}{A_1^2} \sigma_1^2 = \frac{\sigma_1^2}{A_1^2} \sum_{i=1}^N A_i^2 \quad (8)$$

则式(6)可表示为

$$\begin{aligned} SNR_2 &= \frac{A_1^2}{\sigma_1^2} \left(\sum_{i=1}^N A_i \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right) = \\ &= \frac{A_1^2}{\sigma_1^2} \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N A_i A_j \right) / \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right) = \\ &= \frac{A_1^2}{\sigma_1^2} \left[1 + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N A_i A_j \right) / \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其分贝形式为

$$\begin{aligned} SNR_2 &= SNR_1 + 10 \lg \left[1 + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N A_i A_j \right) / \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right) \right] \geq \\ &= SNR_1 \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知, 经单阵元时间反转镜处理后, 信噪比 $SNR_2 \geq SNR_1$, 当无多径信号时, 等号成立。系统聚焦增益与多径信号的数量及幅度有关, 多径分量越多, 越能起到聚焦效果。但与基阵 TRM 相比, 牺牲了空间增益, 导致等效信道冲激响应的自相关函数旁瓣较高^[13]。

4 系统性能仿真

根据 3.1 系统模型,对于一典型基于被动式时间反转镜的无线传输系统进行建模与计算机仿真,假定发端信号为单极性周期方波脉冲,幅度为 1,频率为 2 MHz;为节约能量,选择常用占空比 20%;信号受到高斯白噪声干扰,信噪比设置为 5 dB、0 dB、-5 dB,分别代表信道条件较好、一般、较差;探测信号 $p(t)$ 分别设置为已有文献提及的三种常用探测信号:瞬时方波脉冲、高斯白噪声信号、调频信号;在此三种情况下对接收端的接收波形进行仿真。本部分目标是:第一,直观给出三种不同探测信号情况下基于 PTRM 的无线通信系统的输入输出信号波形,为系统性能研究奠定基础;第二,分析不同探测信号对系统性能的影响,得出探测信号选择的一般原则方法。

4.1 探测信号 $p(t)$ 为一瞬时方波脉冲,持续时间为 100 ns,幅度为 1

原始发送信号如图 2 所示,周期性脉冲波形受到噪声干扰,信噪比分别设置为 5 dB、0 dB、-5 dB,随着信噪比由 5 dB 减小至 -5 dB,原始脉冲信号畸变渐趋严重,当 SNR 达到 -5 dB 时,信号已基本完全被噪声淹没。当探测信号为瞬时方波脉冲时,接收信号 $r(t)$ 的归一化幅度与时间的关系如图 3 所示,随着信噪比降低,接收到的脉冲波形畸变越来越严重,波动越来越明显,表现为波形边缘不清晰、毛刺增加、各个脉冲大小差别增大。但即便如此,在 $SNR = -5$ dB 的低信噪比条件下,依然保持了较好接收的波形,可以从中恢复出原始信号。

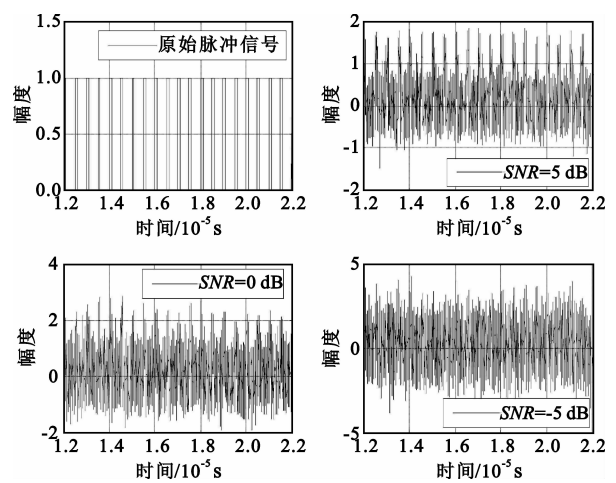


图 2 原始发送信号及受噪声干扰后的波形
Fig.2 The original transmitted signal and the contaminated signals after propagation

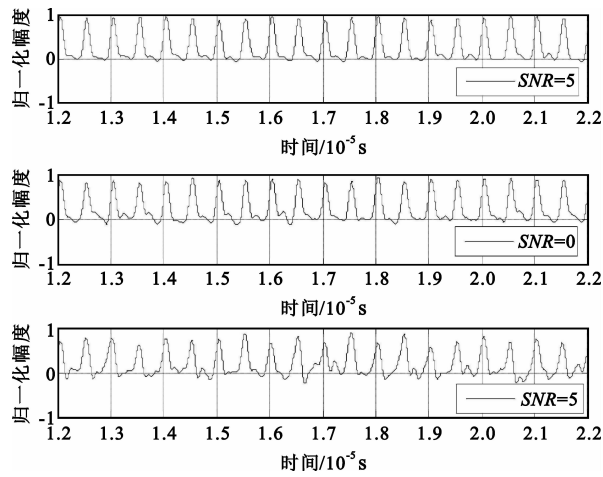


图 3 $p(t)$ 为方波脉冲时的接收波形
Fig.3 The received waveform with a square pulse being the pilot signal

4.2 探测信号 $p(t)$ 为白噪声序列,持续时间为 100 ns

将探测信号 $p(t)$ 改为白噪声序列,则接收到的信号 $r(t)$ 如图 4 所示,随着信噪比下降,接收到的波形波动加剧,脉冲形状越来越不规则,特别是当信噪比下降到 -5 dB 时,除波形剧烈抖动外,“伪波峰”明显增多且高度增大。对比图 3 可知,白噪声序列作为探测信号时,接收波形对于信噪比的依赖程度远高于瞬时脉冲作探测信号的情形,系统性能亦不如 4.1 的情况。

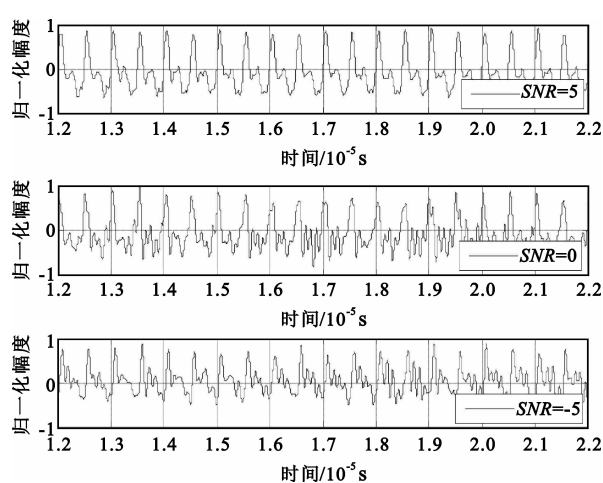


图 4 $p(t)$ 为白噪声序列时的接收波形
Fig.4 The received waveform with a white Gauss noise signal being the pilot signal

4.3 探测信号 $p(t)$ 为线性调频序列,持续时间为 100 ns

用频率为 20 MHz 的载波对指数信号进行调频并

将其作为探测信号 $p(t)$, 得到接收端的信号如图 5 所示。由仿真结果可见, 当信噪比为 5 dB 时, 接收脉冲波峰清晰, 可还原出发端脉冲波形, 当信噪比下降到 0 dB 时, “伪波峰” 的幅值已增大到可与接收脉冲峰值相比拟的程度, 因信噪比下降后, 脉冲波形有畸变, 部分波峰值下降, 此时已很难区分脉冲波峰的真伪。换言之, 从接收波形恢复出发端脉冲较为困难。当信噪比进一步下降到 -5 dB 时, 系统性能进一步恶化, 基本无法恢复发端脉冲波形。

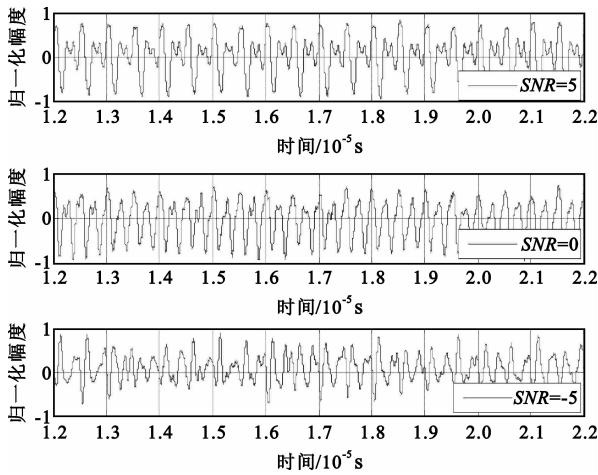


图 5 $p(t)$ 为调频序列时的接收波形

Fig. 5 The received waveform with a frequency modulation signal being the pilot signal

4.4 仿真结果分析

由前面的仿真结果可知, 探测信号 $p(t)$ 的选择对于系统性能的影响很大。图 3~5 的结果表明, 用瞬时方波脉冲作探测信号, 系统性能最好, 且对于信噪比的下降不敏感; 白噪声信号、调频信号作为探测信号时, 系统性能均会下降, 出现波形抖动明显、“伪波峰” 增大的情况, 严重时无法恢复发端波形。究其原因, 主要是不同探测信号的自相关函数性能不同造成的。3.1 节中提及, 要通过被动时间反转镜完美再现发端波形, 应尽量满足

$$h(t) * h(-t) \approx \delta(t)$$

和

$$p(-t) * p(t) \approx \delta(t)$$

这两个条件, 但信道冲激响应的自相关特性难以人为干预, 故需尽量满足第二个条件。

众所周知, 同等条件下, 白噪声信号的自相关峰

最尖锐, 最接近于 δ 函数, 但在 4.1~4.3 节的仿真中性能却不是最好的。这是因为文献[13]在推导式(2)、式(3)时, 忽略了干扰噪声, 故最终接收信号的表达式如式(3)所示。作为实际系统, 构造发送信号时间反转预处理模块时, 探测信号本身也会受到噪声的干扰, 最终与 $p(t)$ 完成卷积运算的是 $p_r(-t)$ 而非 $p(-t)$ 。故从实际情况看, 真正要关心的是 $p(t) * p_r(-t)$ 是否具有尖锐的主瓣和小的旁瓣, 应将此作为选择探测信号的重要依据。为证明此结论, 在与 4.1~4.3 节同等仿真条件下, 图 6~8 给出了无噪声 (即图中 $SNR = \infty$) 情况、信噪比分别为 5 dB、0 dB、-5 dB 三种情况时, $p(t) * p_r(-t)$ 随时间变化的波形, 为讨论方便, 后续将 $p(t) * p_r(-t)$ 称为“有扰自相关函数”。

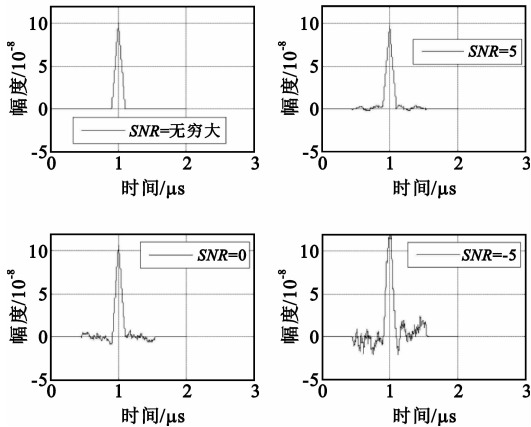


图 6 $p(t)$ 为方波脉冲时 $p(t) * p_r(-t)$ 波形

Fig. 6 The waveform of $p(t) * p_r(-t)$ with a square pulse being the pilot signal

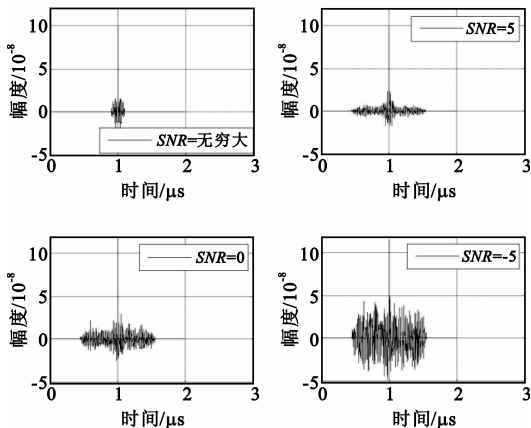


图 7 $p(t)$ 为白噪声时 $p(t) * p_r(-t)$ 波形

Fig. 7 The waveform of $p(t) * p_r(-t)$ with a white Gauss noise signal being the pilot signal

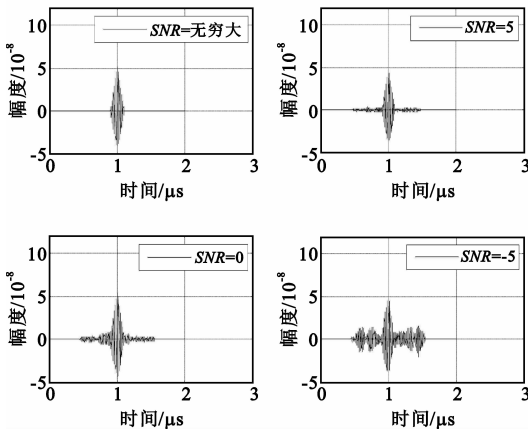


图 8 $p(t)$ 为调频序列时 $p(t) * p_r(-t)$ 波形
Fig.8 The waveform of $p(t) * p_r(-t)$ with a frequency modulation signal being the pilot signal

由仿真结果可以得到以下结论:

第一,对于无噪声信道,白噪声信号的自相关函数具有极尖锐的主瓣和很小的旁瓣,最接近于 δ 函数,基本接近理想情况;

第二,当信号受到噪声干扰时,相比于其他两种探测信号,方波脉冲的有扰自相关函数兼具主瓣较大、旁瓣较小的优点,特别是当信噪比下降到 -5 dB 时,白噪声信号的有扰自相关函数旁瓣幅度已几乎增大到主瓣的一半,调频信号有扰自相关函数主瓣本身较小,严重影响了接收端波形。但方波脉冲做探测信号时,依然可以正常恢复发端信号;

第三,方波脉冲在各种信噪比条件下,有扰自相关函数波形边沿始终清晰,说明其波形平稳,随时间波动不大,而其他两种探测信号波形在低信噪比条件下的旁瓣几乎成为“实体”,说明其波形随着时间剧烈波动,这也印证了 4.1~4.3 的仿真波形中,图 3 的接收脉冲光滑而图 4、图 5 的脉冲波动剧烈、毛刺较多这一现象。

文献[13]研究了基于被动时间反转镜的水声通信系统性能,对选择探测信号 $p(t)$ 给出了两条要求:探测信号的频谱应包含发送信号 $s(t)$ 的频带, $p(t)$ 频谱在频带内应尽量白化; $p(t)$ 的自相关特性好,相关峰尖锐,明显高于旁瓣。由 4.4 节的仿真结果可知,在实际系统中,探测信号也会被干扰,对同一个探测信号而言,有扰自相关函数 $p(t) * p_r(-t)$ 与自相关函数 $p(t) * p(-t)$ 相比,因噪声的存在造成性能差异较大。故选择探测信号时,应将有关扰自相关函数 $p(t) * p_r(-t)$ 的性能作为更重要的指标考察,即除包括文献[13]提到的要求之外,

应包含以下要求:第一,有扰自相关函数 $p(t) * p_r(-t)$ 在低信噪比条件下依然保持较大的主瓣和较小的旁瓣;第二,有扰自相关函数的波形边沿应清晰、主瓣之外的部分波动平缓,以保证接收信号波形随机波动较小。

5 结 论

基于被动时间反转镜原理,建立了基于被动式时间反转镜的单阵元无线通信模型,通过理论分析推导了系统的聚焦增益,指出了部分文献在推导接收信号表达式时存在的不足,在此基础上通过计算机仿真模拟了系统性能。

仿真结果表明,给定信道条件时,系统性能主要取决于探测信号,方波脉冲作为探测信号时,在较低信噪比条件下可获得较好的系统性能。对三种不同探测信号对接收波形的影响进行了详细分析和仿真论证,并得出了相关结论。研究表明,为获取更好的系统性能,探测信号的选择除应满足频带尽量“白化”、自相关峰尖锐之外,还应满足:有扰自相关函数 $p(t) * p_r(-t)$ 在低信噪比条件下依然保持较大的主瓣和较小的旁瓣、有扰自相关函数的波形边沿应清晰且在主瓣之外的部分波动平缓,以保证接收信号波形随机波动较小。这一结论从实际应用角度对于探测信号的选择给出了更明确、科学的原则,对基于单阵元被动时间反转镜的通信系统选择探测信号具有普适性。后续的研究应基于仿真结论,从数学分析角度对探测信号的选择提出具体的指标要求。

参考文献:

- [1] Fink M. Time reversed acoustics[J]. Physics Today, 1997, 50(3):33 - 40.
- [2] Kosmas P, Rappaport C M. Time reversal with the FDTD method for microwave breast cancer detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(7):2317 - 2323.
- [3] Kim S, Kuperman W A, Hodgkiss W S, et al. Robust time reversal focusing in the ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(1):145 - 157.
- [4] Liu D, Kang G, Li L, et al. Electromagnetic time-reversal imaging of a target[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(9):3058 - 3066.
- [5] Kyritsi P, Papanicolaou G, Peggers P, et al. Time reversal techniques for wireless communications[C]//Proceedings of 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2004:47 - 51.
- [6] Qiu R C, Hu Z. Time reversed transmission with chirp signaling for UWB communications and its application in confined

- metal environments[C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Singapore: IEEE, 2007:276-281.
- [7] Qiu R C, Zhou C, Guo N, et al. Time reversal with MISO for ultrawideband communications; experimental results[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, 5(1):269-273.
- [8] Guo N, Zhang J Q, Qiu R C, et al. UWB MISO time reversal with energy detector receiver over ISI channels[C]//Proceedings of the 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, NV: IEEE, 2007:629-633.
- [9] Guo N, Qiu R C, Sadler B M. An ultra-wideband autocorrelation demodulation scheme with low-complexity time reversal enhancement[C]//Proceedings of 2005 IEEE Military Communications Conference. Atlantic City, NJ: IEEE, 2005:3066-3072.
- [10] Guo N, Sadler B M. Reduced-complexity UWB time-reversal techniques and experimental results[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12):4221-4226.
- [11] 付永庆, 夏云龙. 基于时间反转镜的自适应聚焦仿真研究[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(4):14-18.
FU Yong-qing, XIA Yun-long. Simulation on self-adaptive focusing based on time reversal mirror[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2007, 33(4):14-18. (in Chinese)
- [12] 惠俊英, 马敬广, 李峰, 等. 二元阵被动时间反转镜定位技术研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(11):1247-1251.
HUI Jun-ying, MA Jing-guang, LI Feng, et al. Passive localization technology using time reversal with a two-sensor array[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(11):1247-1251. (in Chinese)
- [13] 殷敬伟, 惠娟, 惠俊英, 等. 无源时间反转镜在水声通信中的应用[J]. 声学学报, 2007, 32(4):363-368.
YIN Jing-wei, HUI Juan, HUI Jun-ying, et al. Application of passive time reversal mirror in underwater acoustic communication[J]. Acta Acustica, 2007, 32(4):363-368. (in Chinese)
- [14] 殷敬伟, 惠俊英, 郭龙祥. 点对点移动水声通信技术研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3):1753-1758.
YIN Jing-wei, HUI Jun-ying, GUO Long-xiang. Study on point-to-point mobile underwater acoustic communication[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3):1753-1758. (in Chinese)
- [15] 朴大志, 李启虎, 孙长瑜. 时间反转技术对水声多输入多输出系统干扰抑制性能的研究[J]. 通信学报, 2008, 29(7):81-87.
PIAO Da-zhi, LI Qi-hu, SUN Chang-yu. Study of the interference reducing capability of time reversal techniques in underwater acoustic MIMO systems[J]. Journal on Communications, 2008, 29(7):81-87. (in Chinese)
- [16] 殷敬伟, 张晓, 赵安邦, 等. 时间反转镜在水声通信网上行通信中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(1):1-5.
YIN Jing-wei, ZHANG Xiao, ZHAO An-bang, et al. The application of a virtual time reversal mirror to upstream communication of underwater acoustic networks[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(1):1-5. (in Chinese)
- [17] 梁新星. 基于发射端多天线的超宽带无线通信系统的时间反演传输特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
LIANG Xin-xing. Research on time reversal transmission characteristic of the ultra-wide band wireless communication system based on multi-antenna transmitter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [18] 张益. 基于时间反演技术的超宽带无线通信的实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
ZHANG Yi. Experimental research on the ultra-wide band wireless communication based on time reversal[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)

作者简介:



李宏博(1979—),男,陕西扶风人,2007年获硕士学位,现为讲师,主要从事通信理论与仿真应用研究;

LI Hong-bo was born in Fufeng, Shaanxi Province, in 1979. He received the M.S. degree in 2007. He is now a lecturer. His research concerns communication theory and simulation.

Email: lihongbo7909@163.com

陈长兴(1964—),男,河北宝坻人,2004年获博士学位,现为教授,主要从事雷达信号处理研究。

CHEN Chang-xing was born in Baodi, Hebei Province, in 1964. He received the Ph.D. degree in 2004. He is now a professor. His research concerns radar signal processing.