

# 透地无线通信的弱信号捕获算法

杨天绘 易克初 田红心

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 基于电流场传播的无线透地通信系统, 提高接收机灵敏度的关键之一是在尽可能低的信噪比下实现信号的可靠捕获。本文对传统滑动相关捕获算法进行了改进, 提出了一种信号捕获新算法。系统采用高增益直接序列扩频及超宽带脉冲基带调制方式, 每个码片都调制为一个近似于高斯微分脉冲的正负双峰波形。接收信号以每个码片 16 个样点的速率采样量化, 时分分接为 16 路信号, 各路都用相同的 PN 码相关器进行滑动相关解扩, 每一时刻取其中某两路信号相关量之差作为判决量。理论分析和仿真结果都显示, 和传统的滑动相关捕获算法相比, 新方法实现可靠捕获所需信噪比可降低 7.2 dB。

**关键词:** 滑动相关捕获; 低信噪比; 透地通信

**中图分类号:** TN911      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2017.07.010

## A Weak Signal Acquisition Algorithm in Through-the-Earth Communication

YANG Tian-hui YI Ke-chu TIAN Hong-xin

(State Key Laboratory of Integrated Services Network, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Weak signal acquisition plays a crucial role in current field based through-the-earth communication system. In this paper, we improve the traditional sliding correlation acquisition algorithm and propose a weak signal acquisition algorithm in through-the-earth communication. Ultra-Wideband (UWB) pulse shape modulation and high gain spread spectrum is adopted by communication system, and each chip is modulated as a waveform that is similar to a Gaussian derivative pulse with positive and negative peaks. The received signal is sampled and quantized at a rate of 16 samples per chip and divided into 16 channels according to the time tapping technology. Each channel uses the same PN code correlator for sliding correlation despreading. Sixteen correlation values can be obtained and the difference between the two of them are used as a decision parameter. Both theoretical analysis and simulation results validate that the proposed algorithm shows a great advantage over the conventional one about 7.2 dB.

**Key words:** slippage correlation acquisition; low signal-to-noise ratio; through-the-earth communication

### 1 引言

透地无线通信应该是重大矿难发生时的最后生命线,前几年智利发生重大矿难时是靠钻机打洞、用铁丝绑字条获得井下人员信息而成功施救的。可见人们多么盼望能有一种透过土层岩层实现井下与地面之间的无线通信手段,但这却是一个至今尚未突破的世界级难题。当电磁波穿过岩层时,由于岩层导电性以及趋肤效应,信号迅速衰减

而无法远传<sup>[1]</sup>。采用 1 ~ 30 kHz 频率的电信号,施加于打在岩层或土层上的两个电极之上,可以在岩层或土层中形成电流场,并可在较远处两个接收电极之间检测到信号电压而实现通信,这就可突破电磁波无法在半导体介质中远距离传播的制约,实现较远距离通信。这一点已被我们多年的实践所证实<sup>[2-3]</sup>。作者所在课题组经过多年的努力,在透过洞内与洞外之间近 500 米距离的土层与岩层进行无线通信实验取得成功,但它离实用要求还存在较大

差距。在这种基于电流场的通信模式下,接收信号电压与传输距离成三次方衰减<sup>[4]</sup>,所以随着通信距离的增加,信号迅速变弱,达到  $\mu\text{V}$  甚至  $\text{nV}$  级。显然,扩大通信距离、提高接收机灵敏度的关键之一是如何可靠地捕获到这种功率谱密度及信噪比都极低的通信信号<sup>[5-6]</sup>。

在本系统中,采用高增益直接序列扩频(简称直扩)与超宽带脉冲基带调制方式相结合体制,每个码片都调制为一个近似于高斯微分脉冲的正负双向波形,对于透地通信而言这种信号形式是一种理想的选择。当前常用于扩频通信伪码捕获方法有滑动相关法、匹配滤波器法、序贯估值法等<sup>[7]</sup>。其中序贯估值法不适用于本系统,匹配滤波法用 FPGA 实现起来硬件资源消耗太大,使用滑动相关法捕获是较好的选择。

滑动相关捕获的原理是利用伪随机序列的自相关特性,当接收信号与本地参考信号达到同步时会出现一个相关峰值,不同步时相关值接近零,接收信号与本地参考信号进行相关运算,相关值与门限进行比较,小于门限则改变相位重新计算相关值,大于门限则完成捕获进入跟踪<sup>[8]</sup>。捕获的关键在于得到足够大的相关解扩处理增益。在低信噪比条件下,常需要采用较长的积分时间,用相干积分结合非相干积分的方式以增加处理增益<sup>[9]</sup>。文献<sup>[10-11]</sup>针对捕获时间对传统滑动相关捕获算法进行了改进,保持原捕获性能的条件下,降低了平均捕获时间。

本文在传统的滑动相关捕获算法的基础上提出一种性能优良的改进方法;充分利用基带信号波形以提高信噪比,合理设计信号帧结构,有效利用同步头,从而提高捕获概率,获得更高的捕获性能。

## 2 透地无线通信系统

本文采用直扩技术与超宽带脉冲技术<sup>[12]</sup>相结合,构成直扩超宽带脉冲调制通信系统,系统框图如图 1 所示。

直扩具有较强的抗干扰性能,在接收信号信噪比相同的条件下,其抗噪声干扰能力与直扩系统的处理增益成正比,即与 PN 码长成成正比。所以,通过加长 PN 码长度可以提高接收灵敏度。但是,PN 码越长,捕获所需的时间将越长。

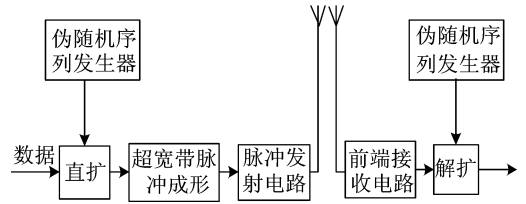
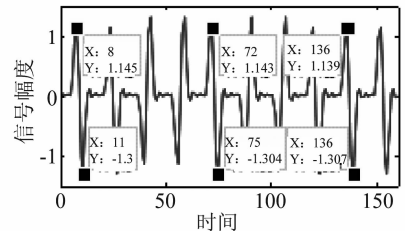


图 1 系统原理框图

Fig. 1 System principle block diagram

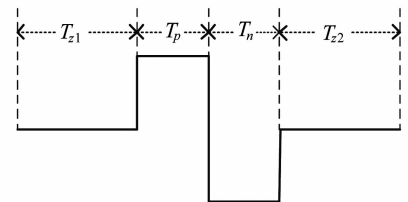
本系统所采用的超宽带脉冲调制是一种无载波调制方式,而且因为其比较小的占空比而能直接产生较宽的带宽。其本质上也是一种扩频调制,它是采用频带效率很低的成形波进行基带调制的,接收端通过适当的波形处理也可以获得信噪比增益。同时由于其峰值功率与平均功率之比值很高,十分有利于在扩大通信距离的情况下改善系统的本质安全特性。

本系统的码片成形波采用如图 2(a)所示的超宽带脉冲,其波形近似于高斯脉冲的一阶微分。它是由如图 2(b)所示的双向矩形脉冲经(0.5 kHz, 25 kHz)的带通滤波器滤波后所产生的输出,此过程的硬件实现非常简单方便<sup>[13]</sup>。



(a) 滤波处理后的波形

(a) Waveform after filtering



(b) 原型波的一个周期

(b) A period of prototype wave

图 2 超宽带脉冲波形

Fig. 2 Waveform of Ultra-Wideband pulse

原型波由  $T_{z1}$ 、 $T_p$ 、 $T_n$ 、 $T_{z2}$  四部分构成各部分所占的比例为 5:3:3:5。

图 2(a)所示的码片成形波的功率谱如图 3 所示,其信号功率集中在 0.5 ~ 25 kHz 的甚低频段,相

对带宽很宽,故有较强的穿透能力。旁瓣衰减较大,能量集中在主瓣,方便于接收机接收端进行信号滤波。

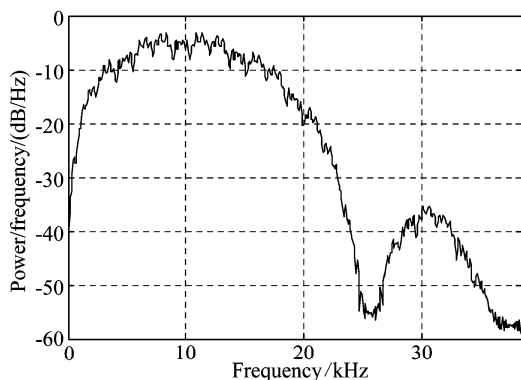


图3 超宽带脉冲功率谱

Fig.3 Power spectrum of UWB pulses

### 3 捕获算法

#### 3.1 伪码的选取

伪码(PN码)的选择对于捕获也至关重要,其相关性直接决定了捕获性能。PN码需要具有良好自相关性,尖锐的相关峰。捕获时,在一个信息符号长度范围内做滑动相关,在无误码情况下,相关值的模最大值出现在与本地PN码完全对齐时。PN码的类型和长度决定了PN码的相关性。最常用的PN码是 $m$ 序列<sup>[9]</sup>,即最大长度移位寄存器序列。对长度为 $N$ 的双极性二进制 $m$ 序列,由于其周期 $P_{N+j}=P_j$ ( $P_j$ 为 $j$ 时刻PN码的值),故其循环自相关函数:

$$R(j) = \sum_{i=0}^{N-1} P_i P_{i+j} = \begin{cases} N, & j=0 \\ -1, & j \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

这种 $\delta$ 函数形式的自相关函数对于同步捕获本来是极为有利的,然而我们的同步头不可能多次重复而可在一段时间内看作周期性PN码,例如我们的同步头就只有两个PN码;这就使得采用本地PN码进行滑动相关时,第一个PN码还只出现一部分时就出现很高的相关值,而产生很高概率的虚警;因此实现可靠的捕获实际上存在很大的难度。

#### 3.2 捕获过程及原理

##### 3.2.1 帧结构

本系统为突发通信方式,且信噪比很低,采用加同步头的方法进行捕获,本文同步头由两个长度

为 $N$ (=16383)的相同的 $m$ 序列构成,帧结构如图4所示。

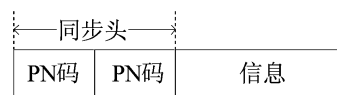


图4 帧结构

Fig.4 Frame structure

##### 3.2.2 解扩

本系统为无载波调制基带传输数字通信系统,所以不存在频偏对捕获性能的影响,因此接收端的接收信号不必表示为复信号,而表示为实信号,经过采样量化后,得到

$$r(n) = A \cdot \text{PN}(n) + N(n) \quad (2)$$

其中 $A$ 为信号幅度, $\text{PN}(n)$ 为发送的同步头PN码第 $n$ 点的采样值, $N(n)$ 为噪声分量,一般可假定为零均值的高斯白噪声,设其方差为 $\sigma^2$ 。接收端存储与同步头相同的PN码作为本地PN码,接收信号与本地PN码进行滑动相关,得相关值

$$R_{\text{PN}}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} [A \cdot \text{PN}(n+m) \cdot \text{PN}(n) + N(n+m) \cdot \text{PN}(0)] \quad (3)$$

我们取 $|R_{\text{PN}}(m)|$ 作为判决量进行捕获判决,设

$$R_{\text{PN}}(m) = R_{\text{PN}} + R_{N,\text{PN}} \quad (4)$$

其中 $R_{\text{PN}}$ 为接收信号中PN码信号与本地PN码的互相关值, $R_{N,\text{PN}}$ 为接收信号中 $N(n)$ 与本地PN码的互相关值。那么 $R_{\text{PN}}(m)$ 的概率分布密度函数有两种情况:

1. 当 $m \neq 0$ 时, $R_{\text{PN}}$ 的值很小,可以忽略不计,而 $R_{N,\text{PN}}$ 等于 $N$ 个0均值、 $\sigma^2$ 方差的独立高斯随机变量之和,所以它是一个均值为0、方差为 $N\sigma^2$ 的高斯随机变量,因此 $R_{\text{PN}}(m)$ 的概率密度函数为

$$p(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}\sigma} e^{-\frac{Z^2}{2N\sigma^2}} \quad (5)$$

2. 当 $m=0$ ,即与本地PN码对齐时, $R_{\text{PN}}=AN$ ,而 $R_{N,\text{PN}}$ 仍然与上述情况相同,因此 $R_{\text{PN}}(m)$ 的概率密度函数为

$$p(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}\sigma} e^{-\frac{(Z-AN)^2}{2N\sigma^2}} \quad (6)$$

这两种情况下 $R_{\text{PN}}(m)$ 的概率密度函数曲线如图5所示。

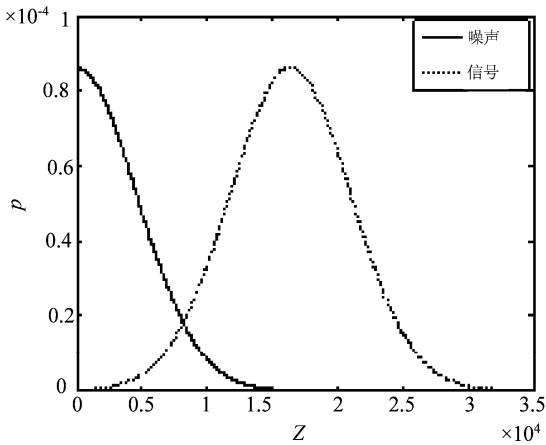


图 5 滑动相关器输出的概率密度函数曲线

Fig. 5 The PDF curve of the shifting correlator output

### 3.2.3 捕获过程

从如图 2(a) 所示的码片成形波,可以发现,当采样率为每一个码片为 16 个采样点的情况下,同一个码片周期内的正负双峰脉冲,最大值和最小值峰点之间的距离恒为 3,因此捕获时,将接收信号时分接为 16 路样点序列,将它们分别与本地 PN 码进行滑动相关运算,在滑动过程中每一时刻可得到 16 个相关量,将每隔两个相关量相减再取绝对值,当作捕获判决量,进行是否到达同步点的判决。下面分析这种方法带来的增益:

1. 若保留全部 16 个值,信号幅度为 1,噪声功率为  $\sigma^2$ ,则信号分布在 6 个点,功率  $S_1 = 6 * 1^2 = 6$ 。噪声分布在全部 16 个点上,功率  $N_1 = 16 * \sigma^2$ ,其信噪比

$$\frac{S_1}{N_1} = \frac{6}{16\sigma^2} \quad (7)$$

若用峰峰值相减的方法,信号为最大值与最小值的差,其幅度为 2,故功率  $S_2 = 2^2 = 4$ ,此时有效噪声分布在用于相减的两个值上,噪声功率  $N_2 = 2\sigma^2$ ,其信噪比

$$\frac{S_2}{N_2} = \frac{4}{2\sigma^2} \quad (8)$$

用这种峰峰值相减的方法相比于保留全部 16 个值获得的增益

$$G_1 = \frac{S_2/N_2}{S_1/N_1} = \frac{4/(2\sigma^2)}{6/(16\sigma^2)} = \frac{16}{3} \approx 7.2 \text{ dB} \quad (9)$$

2. 若在 16 个值中只取最大值,即进行 16 倍下采样,其信噪比

$$\frac{S_3}{N_3} = \frac{1}{\sigma^2} \quad (10)$$

可见用峰峰值相减方法相对于 16 倍下采样,可获得的增益为

$$G_2 = \frac{S_2/N_2}{S_3/N_3} = \frac{4/(2\sigma^2)}{1/\sigma^2} = 2 \approx 3 \text{ dB} \quad (11)$$

所以在本文所设计的超宽带脉冲波形进行 16 倍上采样情况下,用峰峰值相减的方法相对于传统滑动相关算法,即保存全部 16 个点,能获得大约 7.2 dB 的增益。相对于直接进行 16 倍下采样即保留最大值的算法,能够获得 3 dB 的增益。

接收到的信号与本地 PN 码进行相关加和运算得到相关值后,判断信号是否捕获到有两种方法:门限法和寻找最大值的方法。门限法为每计算出一个相关值,便和设定的门限进行比较,大于门限则为捕获成功进入信号跟踪,小于门限则滑动一位即改变相位重新计算相关值。寻找最大值的方法为每个周期找一个最大值,若最大值位置周期出现,或者大于设定门限值,则为捕获到。门限法虚警概率大于最大值法,但漏检概率小于最大值法。同时最大值法需要更长的捕获时间且占用的硬件资源也更多。

本系统为突发通信模式。所以在保证小于一定的虚警概率时,还要使漏检概率尽可能小。

因此,综合考虑捕获时间和捕获性能,结合门限法和最大值法,以及本系统的使用环境,提出了一种性能优异的捕获算法,其捕获过程如图 6 所示。

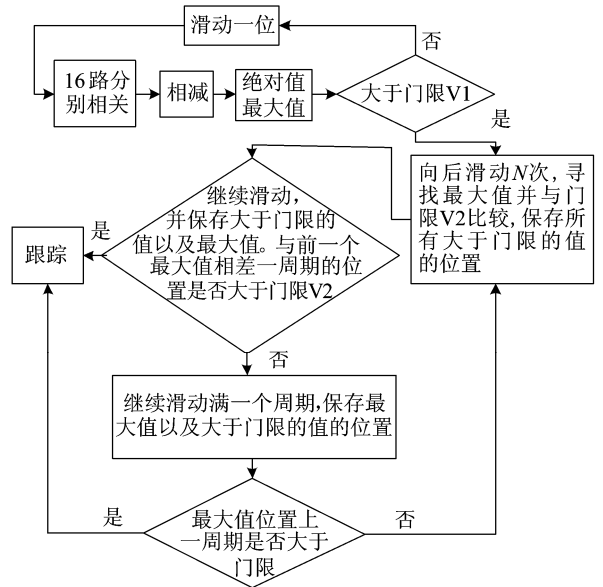


图 6 捕获流程图

Fig. 6 Flow chart for acquisition

1)对信号进行16路并行接收,分别与本地PN码进行滑动相关,在每16个采样时间间隔内得到16个相关值,将每隔两路的相关值相减再取绝对值,将它们比较大小后保留绝对值最大者作为判决量,并记下其相对位置。

2)将判决量与门限值 $V_1$ 比较,若小于 $V_1$ ,则接收信号滑动一位后再重复过程1),若判决量大于门限 $V_1$ ,进入过程3)。

3)接收信号每滑动一位,进行一次过程1),重复 $N$ (一个周期)次,在计算出的 $N$ 个最大值中找到最大值并保存其位置,为了降低漏检概率,在找到最大值的同时保存接收信号所有大于门限 $V_2$ 的位置, $V_2$ 相比 $V_1$ 高一些,由所需虚警概率决定。

4)接收信号继续滑动,每滑动一次进行一次过程1)。首先看与过程3)找到的最大值位置相差一个周期的位置是否大于门限,若大于门限,则信号捕获到进入跟踪。若没有达到门限,则继续滑动找到这一周期的最大值以及暂时保存下大于门限的值,然后在与上一周期的值进行比较,判断与最大值相差一个周期的位置是否大于门限,若大于门限,则捕获到,若小于门限,则继续过程3)。

总之,捕获的原理是首先16路分别相关,每隔两路两两相减,保存这16个差值的绝对值的最大值,在一个PN码周期内寻找最大值,然后用最大值位置下一周期(或者上一周期)处是否大于门限进行验证。即滑动相关过程中一个PN码周期内的最大值在上一周期或者下一周期相同位置大于门限则为捕获到。这样可以在保证原有虚警概率的条件下,降低漏检概率,从而提高捕获概率。

### 3.2.4 门限的计算

由式(5)可以知道噪声的分布函数 $P(Z)$ ,从而得到虚警概率 $P_{fa}$ 和门限 $V$ 的关系<sup>[14]</sup>,如下式所示。若所需要虚警概率为 $P_{fa}$ ,则有:

$$P_{fa} = \int_V^{\infty} P(Z) dZ = \int_V^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi N\sigma}} e^{-\frac{Z^2}{2N\sigma^2}} dZ \quad (12)$$

由 $P_{fa}$ 便可以计算出所需的门限。

## 4 算法性能仿真和分析

### 4.1 峰峰值相减法的捕获性能

Matlab仿真,同步头为一个PN码,PN码长度为16383,采用前述超宽带脉冲波形进行基带调制

(即码片波形成形滤波),采样速率为16样点/码片。在接收端分为16路并行接收,本地PN和发送端PN码相同,长度为16383。捕获算法为滑动相关寻找最大值法,即在一个周期内寻找最大值,若最大值大于门限即为捕获到。仿真两种捕获方案。

**方案1** 16路相关之后,保留16路里的最大值,然后滑动相关捕获。

**方案2** 采用本文提出的,16路相关之后,先每隔两路相减,保留差值最大值,然后滑动相关捕获。

一次捕获到的仿真结果如图7所示,每个捕获周期计算量如表1所示。

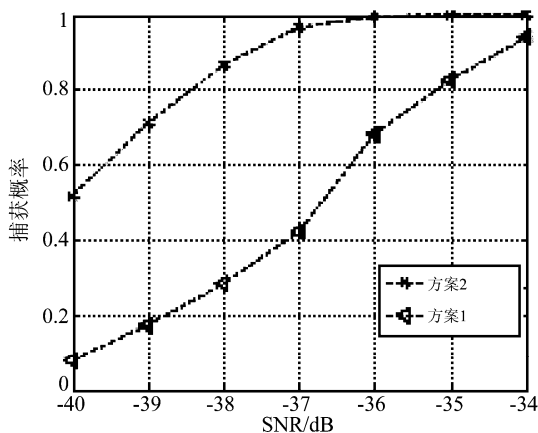


图7 两种方案下的捕获概率

Fig.7 Detection rates for different detection strategies

表1 捕获过程计算量

Tab.1 The calculation number of capturing process

	乘法运算次数	加法运算次数
方案1	$16N^2$	$16N^2+15N$
方案2	$16N^2$	$16N^2+16N+15N$

为了对比,再仿真传统的滑动相关捕获算法,即接收端本地PN码也进行相同16倍上采样。与接收信号直接进行串行滑动相关捕获,与方案2峰峰值相减的方法进行对比,因为二者扩频增益不同,信噪比SNR归一化为 $E_b/N_0$ ,捕获概率如图8所示,每个捕获周期计算量如表2所示。

表2 捕获过程计算量

Tab.2 The calculation number of capturing process

	乘法运算次数	加法运算次数
峰峰值相减	$16N^2$	$16N^2+31N$
传统滑动相关	$(16N)^2$	$(16N)^2$

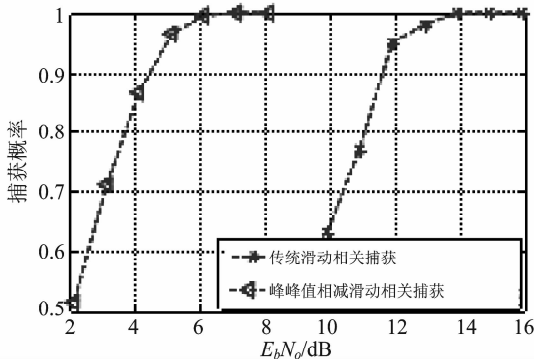


图8 两种捕获算法下的捕获概率

Fig. 8 Detection rates for different acquisition algorithms

分析图7,方案2在信噪比为-37 dB时,捕获概率达到0.95,而方案1在-34 dB时其捕获概率大约为0.95,所以用峰峰值相减的方法,其性能和直接在16路中取最大一路的方法相比提高了大约3 dB。同时,由表1可知方案2和方案1相比乘法次数相同,因为进行了峰峰值相减运算,加法运算次数增加了 $16N$ 。由于计算机加法运算相对于乘法运算而言快很多所以可以认为用峰峰值相减的方法和直接取最大值的方法所需的捕获时间基本相同。同理,分析图8可知,峰峰值相减的滑动相关捕获要比传统滑动相关捕获性能提升大约7 dB。仿真结果和理论值基本相符。且由表2可知峰峰值相减滑动相关捕获相对于传统滑动相关捕获算法,其乘法次数和加法次数都减小了。因为16路并行进行相关运算,有效降低了相关长度,所以其捕获时间相对于传统捕获算法更快一些。

#### 4.2 一个PN码捕获和两个PN码互相验证捕获性能比较

Matlab仿真,发送端PN码长度为16383,接收端本地PN码与发送端PN码相同,采用峰峰值相减的滑动相关捕获算法。分别仿真同步头为一个PN码和同步头为两个相同PN码的捕获方案。

一次捕获到的仿真结果如图9所示。分析图9,用两个PN码互相验证的捕获算法和同步头只有一个PN码的传统滑动相关找最大值的捕获算法相比,以同步头增长为代价换取了大约1 dB的增益,但在相同信噪比下,捕获成功的概率显著提高,例如 $SNR = -37$  dB时,捕获概率由96%提高到99%,这是有重要实用价值的。

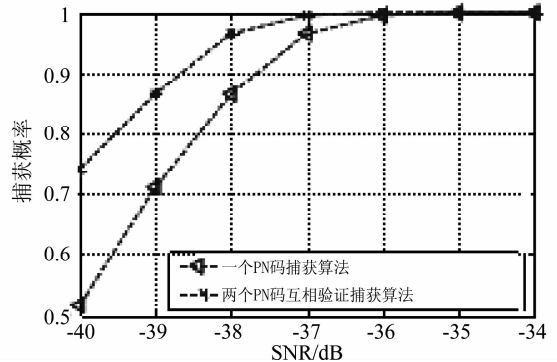


图9 两种捕获算法下的捕获概率

Fig. 9 Detection rates for different acquisition algorithms

## 5 结论

本文在传统滑动相关捕获算法的基础上,提出了一种基于透地无线通信的低信噪比环境下的信号捕获算法。本算法基于所设计的超宽带脉冲波形形状,采用的峰峰值相减的方法提高信噪比。针对所提出的由两个相同长度PN码组成的同步头结构,结合滑动相关捕获门限法和最大值法的优点,采用两个PN码互相验证的方法。大大提高了低信噪比下的信号的捕获性能。

## 参考文献

- [1] Bataller V, Munoz A, Molina P, et al. Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications [J]. *Journal of Communications*, 2009, 4(4):284-294.
- [2] 郝建军, 孙晓晨. 几种透地通信技术的分析与对比 [J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2014(1): 59-63.
- [3] Hao J J, Sun X C. Analysis and comparison of several Through-the-earth communication technologies [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2014(1):59-63. (in Chinese)
- [4] 孙琰. 抗干扰透地通信系统的研制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] Sun Y. Development on Anti-interference Through-the-earth Communication System [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [6] 向新, 易克初, 田红心. 穿透岩层地下电流场通信信道分析 [J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(4):77-79.
- [7] Xiang X, Yi K C, Tian H X. Channel analysis on underground mine communication by electrical field through

- stratum[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(4): 77-79. (in Chinese)
- [5] Zhang Q, Zhang D. Research on Mine Through-Earth Communication System Based on Spectrum Spreading Technology[C]//International Conference on Communication Software and Networks. IEEE Xplore, 2009:713-715.
- [6] 郭银景, 吴凯, 赵媛, 等. 低速率矿山透地通信扩频信号的快速捕获方法研究[J]. 工矿自动化, 2013(6): 32-35.  
Guo Y X, Wu K, Zhao Y, et al. Study on Fast Acquisition Method of Spread Spectrum Signal of Low-rate Mine Through-The-Earth Communication [J]. Industry and Mine Automation, 2013(6):32-35. (in Chinese)
- [7] 曾灵雯, 刘乃安, 孙献璞. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安电子科技大学出版社, 2004.  
Zeng X W, Liu N A, Sun X P. Spread Spectrum Communication and Its Multiple Access Technology [M]. Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 杨灵, 赵笙罡, 胡修林. DSSS 滑动相关捕获算法改进及性能分析[J]. 电讯技术, 2007, 47(1):78-81.  
Yang L, Zhao S Z, Hu X L. Improvement and Performance Analysis of Slippage Correlation Acquisition for DSSS Signals [J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(1):78-81. (in Chinese)
- [9] Xu X, Chen Y. Research on acquisition method of GPS software receiver[C]//Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012 2nd International Conference on. IEEE, 2012:2791-2794.
- [10] 赵志远, 陈树新, 华璐. 基于信噪比控制的滑动相关捕获法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(31):9386-9389.  
Zhao Z Y, Chen S X, Hua L. Sliding Correlation Acquisition Method Based on SNR Control[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(31):9386-9389. (in Chinese)
- [11] 刘震昆, 黄顺吉. 一种 PN 码自适应捕获门限的改进算法[J]. 信号处理, 2006, 22(4):458-461.  
Liu Z K, Huang S J. A improved algorithm of adaptive threshold in acquisition of PN code[J]. Signal Processing, 2006, 22(4):458-461. (in Chinese)
- [12] Nekoogar F. Ultra-wideband communication: Fundamentals and application[M]. Prentice Hall, 2004.
- [13] 易克初, 刘祖军, 田红心, 等. 超宽带岩层通信系统 [P]. 陕西:CN101977083A, 2011-02-16.  
Yi K C, Li Z J, Tian H X, et al. Underground Stratum Communicator Based on UWB Impulse technology [P]. Shaanxi: CN101977083A, 2011-02-16. (in Chinese)
- [14] Kaplan E D. Understanding GPS: Principles and Application [J]. Artech House Mobile Communications, 2005, 59(5):598-599.

#### 作者简介



**杨天绘** 女, 1991年生, 甘肃天水人。西安电子科技大学通信工程学院硕士研究生, 主要研究方向为弱信号检测、通信信号处理。

E-mail: tianhuiw@126.com



**易克初** 男, 1943年生, 湖南涟源人。西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为语音信号处理、卫星通信、通信对抗和通信信号处理。

E-mail: kchy@mail.xidian.edu.cn



**田红心** 男, 1968年生, 湖北人。西安电子科技大学副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为通信信号处理、卫星通信、通信对抗。

E-mail: hxtian@mail.xidian.edu.cn