

文章编号:1000-6893(2010)04-0738-06

一种基于 TDDM 裂谱信号的解模糊位搜索法

刘芳^{1,2}, 冯永新¹

(1. 沈阳理工大学 通信与网络工程中心, 辽宁 沈阳 110168)

(2. 南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094)

A Method of De-illegibility Search Based on TDDM Split Frequency Spectrum Signal

Liu Fang^{1,2}, Feng Yongxin¹

(1. Communication and Network Institute, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

(2. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

摘要: 时分数据调制(TDDM)裂谱信号作为一种新调制信号,具有独有的电文翻转位模糊特性,导致了采用通常的搜索方法无法正确输出电文的现象。针对 TDDM 裂谱信号特性以及现有搜索方法的不足,提出了一种解模糊位搜索法。该方法主要分为合路快捕及解模糊位判决两个阶段。其合路快捕阶段,不但可以快速缩小搜索范围,而且可以避免由扩频方式而引起的漏捕现象;解模糊位判决阶段,可以去除电文翻转位的模糊度,正确输出电文的翻转位置。在理论推导的基础上,从性能及信噪比容限角度进行了仿真测试,测试结果表明,解模糊位搜索法对 TDDM 裂谱信号的电文翻转位判决精度可以达到 100%。

关键词: 时分数据调制; 扩频; 搜索; 捕获; 解模糊位判决; 电文

中图分类号: V249.3; TN914.53; TN96 **文献标识码:** A

Abstract: The aim of accurately outputting navigation data can not be achieved through usual search methods, because of the particular navigation data illegibility characteristic of time division data modulation (TDDM) split frequency spectrum signal as a new modulation signal. Wherefore, a de-illegibility search method is proposed, according to the TDDM split frequency spectrum signal characteristic and the deficiency of usual search methods. The unite-channels fast acquisition phase and the de-illegibility-judge phase are included in this method. The search range is reduced and the leak acquisition phenomenon is avoided through the unite-channels fast acquisition processing. The navigation data illegibility is eliminated and the navigation data is accurately output through the de-illegibility-judge processing. Furthermore, based on theoretical derivation, simulation tests are carried out from the perspectives of performance and the signal to noise ratio (SNR) limit, and the results show that the output accuracy of the navigation data reaches up to 100%.

Key words: time division data modulation; spread spectrum; search; acquisition; de-illegibility-judge; navigation data

随着新一代卫星导航系统的发展,其应用的范围也越来越广泛,尤其在航空航天领域起到导航与定位的应用显得格外重要。进一步,新的卫星信号扩频及调制方式的出现,尤其是以时分数据调制(Time Division Data Modulation, TD-DM)^[1-2]裂谱信号为典型代表的新信号可以说主导了新发展与新应用的要求。因此对其相关技术的研究也倍受关注,而尤为关键的是信号搜索方法的研究。

对于采用新扩频方式的 TDDM 裂谱信号而言,如果采用通常的同步方法进行搜索,则只有

50%的成功概率,无法满足同步接收要求。针对 TDDM 裂谱信号的相关技术,尤其是信号搜索方法的研究还处于起步阶段,相关技术研究还有待深入,因此针对新一代卫星导航信号的发展,特别是现有信号同步技术的不足以及伪码特性与系统应用的需求,提出了解模糊位搜索法,并对此方法进行了测试与分析。

1 TDDM 裂谱信号及搜索方法

1.1 TDDM 裂谱信号特性

TDDM 裂谱信号采用了改进的 TDDM 扩频方式以及二进制偏置载波(Binary Offset Carrier, BOC)^[3-5]调制方式,由于扩频处理采用双极性

收稿日期:2009-02-25; 修订日期:2009-05-20

基金项目:国家自然科学基金(60802031);辽宁省高校创新团队支持计划

通讯作者:刘芳 E-mail: onceowned58@tom.com

不归零编码方式,因此,当电文数据位为 1 时,经 TDDM 扩频处理后只是等效于扩频伪码本身,为此称为同向扩频;而当电文数据位为 -1 时,经 TDDM 扩频处理后,等效于调制了频率为扩频伪码速率 1/2 的方波,因此称为逆向扩频,其原理如图 1 所示。以电文速率为 50 bit/s、扩频伪码速率为 5.115 MHz 的信号为例,逆向扩频结果如图 2(a)所示,由于一个码片时间为 $1/(5.115 \times 10^6)$ s,而等效调制的方波频率为 2.557 5 MHz,因此一个周期的方波时间为 $1/(2.557 5 \times 10^6)$ s,可见方波频率为扩频伪码速率的 1/2,从而当伪码为奇数位时扩频后结果等效于伪码反转,而当伪码为偶数位时扩频后结果等效于伪码本身;同向扩频结果如图 2(b)所示,可见,无论伪码为奇数位还是偶数位,扩频后结果都等效于伪码本身。

进一步,为了提高信号的抗干扰性,加强裂谱信号的潜在性能,对 TDDM 扩频后序列进行副载波调制 $BOC(f_s, f_c)$,其中伪码速率和副载波的速率分别是基准速率(1.023 MHz)的 f_c 倍和 f_s 倍。调制后信号所存在的优点主要在于特殊的裂谱特性以及自相关函数的多峰值特性。

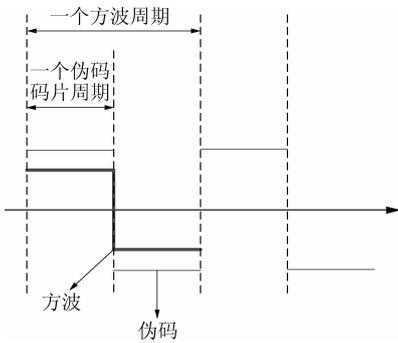


图 1 TDDM 扩频原理
Fig.1 Theory of TDDM

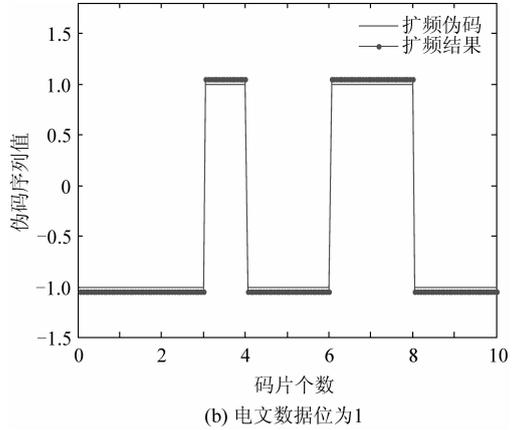


图 2 扩频结果

Fig. 2 Spread frequency spectrum results

1.2 信号搜索

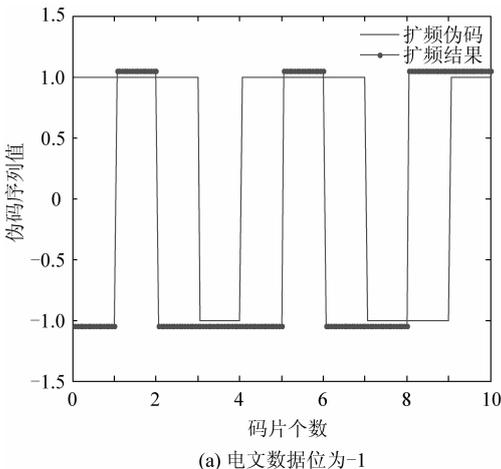
由于 TDDM 裂谱信号的特殊机制及特性,尤其是 TDDM 扩频所引起的电文翻转位出现了模糊现象,因此欲对电文进行最终的解调及输出,以同步为关键技术的捕获搜索及跟踪解调方法的研究就至关重要,然而,由于跟踪解调阶段为精同步阶段,所需输入参数的误差范围较小,而且重复度较高,因此,需在跟踪解调前的捕获搜索^[6-10]阶段对电文的模糊位进行判决,从而可以提高处理速度及解调精度。

由于捕获搜索是建立在序列相关度的基础上,因此需对 TDDM 裂谱信号相关度进行分析,由于真实信号在传输过程中存在一定得环境噪声,而且接收过程中的降频、采样、Doppler^[11]处理等操作,都会降低信号本身的自相关度。当电文数据位为 -1 情况下,解调序列与本地伪码序列的相关峰值已无法确定,相关度等效于噪声的相关结果,而电文数据位为 1 情况下,解调序列与本地伪码序列相关峰值相当明显,其相关度可近似等效伪码本身的自相关结果。

正是由于以上分析的 TDDM 裂谱信号的相关度特性,采用通常的搜索方法^[12-14](如循环相关法)已无法实现其电文翻转位的判决,也无法达到正确跟踪、解调的目的。然而,由于 TDDM 扩频方式的新出现及应用,对其相关技术的研究还处于起步阶段,因此至今还未有相应的捕获搜索算法或方法出现。

2 解模糊位搜索法

由于导航电文每位占 20 ms,而经工程统计分析电文的正负翻转的时间为 40 ms,如果采用



(a) 电文数据位为-1

通常的同步方法(非 TDDM 处理)则只有 50% 的成功概率,无法满足接收要求,因此,为达到正确搜索 TDDM 裂谱信号的目的,同时为电文的有效

输出提供先决条件,针对 TDDM 裂谱信号独有的特性,提出了一种解模糊位搜索法,其总体方案如图 3 所示。

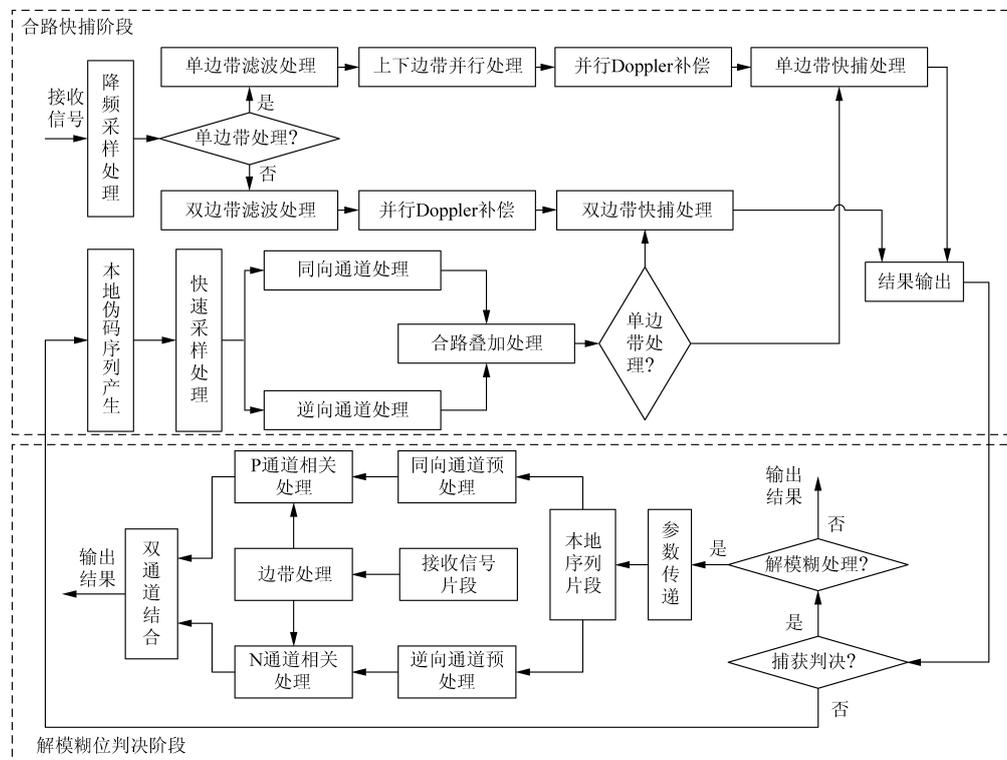


图 3 解模糊位搜索方案

Fig. 3 De-illegibility search method

对 TDDM 裂谱信号 $s(t)$ 进行相关运算时,如果本地复现序列单纯采用扩频伪码,当本次积累时间内接收信号处于逆向扩频方式情况时,则其相关处理后将无明显相关峰值出现,将判为捕获失败,也即判断信号的起始时间不处于此搜索范围内,则会出现漏捕情况。因此,为避免由扩频方式而引起的漏捕现象,进行合路快捕处理,即首先对本地伪码序列进行并行同向(N)、逆向(P)扩频预处理,对于同向扩频处理而言,对当前积累时间内本地序列进行副载波调制;而对于逆向扩频处理而言,则对当前积累时间内本地序列先进行速率为其伪码速率 1/2 的方波调制,复现当电文数据位为 -1 情况下的扩频结果,再通过副载波调制处理,本地复现序列的处理结果为

$$\left. \begin{aligned} s_{\text{local}_P}(t) &= \text{SW}(f_{\text{local}}) \text{PN}_{\text{local}_P}(t) \\ s_{\text{local}_N}(t) &= \text{SW}(f_{\text{local}}) \text{PN}_{\text{local}_N}(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\text{PN}_{\text{local}_P}(t)$ 和 $\text{PN}_{\text{local}_N}(t)$ 分别为 P 通道和 N 通道本地扩频序列; $\text{SW}(f_{\text{local}})$ 为本地副载波序列。

进一步,对处理后的同向及逆向两路本地序列进行叠加运算

$$s_{\text{local}}(t) = s_{\text{local}_P}(t) + s_{\text{local}_N}(t) \quad (2)$$

由于当接收与本地序列扩频方式不同时,相关度等效于噪声的相关结果,因此,无论接收信号当前积累时间内为同向扩频还是逆向扩频,对本地扩频序列进行叠加后都等效为真实扩频后序列与噪声序列叠加结果,值得注意的是,当前积累时间内处于两种扩频方式的翻转时,两路处理后序列都与接收信号有一定的相关度,即每路序列都有部分与真实信号存在相同的扩频方式,其叠加后结果为两路中与真实扩频方式相同部分的片段对接,最终也等效为真实扩频后序列与噪声序列的叠加结果。

然后,利用频域相乘等效于时域卷积的原理,即 $x(t) * h(t) \leftrightarrow X(f)H(f)$,对处理后的接收信号 $s''(t)$ 与本地叠加后序列 $s_{\text{local}}(t)$ 进行相关运算:

$$R(t) = \text{abs}(\text{IFFT}(\text{FFT}(s_{\text{local}}(t)) \cdot \text{FFT}^*(s''(t)))) \quad (3)$$

式中: abs 表示取绝对值; FFT 、 FFT^* 、 IFFT 分别表示快速傅里叶变换、快速傅里叶变换后取共轭、逆快速傅里叶变换。

对相关结果进行最大比例峰值 P_V 及其所在

位置 P_P 的判断及选取, 并进行 Doppler 估计值 P_D 计算:

$$P_V = \frac{\max\{R(t), t = t_P\}}{\text{ave}\{R(t)\}} \quad (4)$$

$$P_P = t_P \quad (5)$$

$$P_D = f_d \quad (6)$$

式中:ave 为相关峰值的平均值。

如果 P_V 未达到门限要求, 则重新接收 TDDM 裂谱信号进行下一次搜索; 如果 P_V 达到门限要求, P_P 则为本地序列与接收信号存在相关性的起始码偏位置, 从而进行控制参数的传递, 进行解模糊位判决处理。通过合路处理, 可以判定一定时间误差范围内的 TDDM 裂谱信号与本地序列存在相关性的起始码偏位置, 从而缩小搜索时间误差及 Doppler 误差。然而, 由于 TDDM 扩频方式对奇偶电文位扩频方式的不同, 为正确输出电文则需判断其当前扩频方式以及扩频方式翻转时的确切翻转位置, 因此进一步进行解模糊位判决处理。

为确定电文翻转位置, 对当前积累时间信号以 t' 为分段量进行分段处理, 在 t' 时间内对本地伪码序列进行并行同向、逆向通道扩频处理, 并进行两通道相关运算, 使电文翻转位判决精度从 50% 提高到 $(100 \times (1 - t' / (2 \times 40)))\%$ 。两通道比例峰值 $P'_{V,P}$ 和 $P'_{V,N}$ 的比值 K_1 与两通道接收信号的相关度比值 K_2 的变化趋势相近, 因此, 引入 P 通道模糊因子 η_P 、N 通道模糊因子 η_N 以及系数 k 分别如式 (7)~式 (9) 所示, 来进行电文翻转位的判定。

$$\eta_P = \frac{P'_{V,P} t'}{P'_{V,P} + P'_{V,N}} \quad (7)$$

$$\eta_N = \frac{P'_{V,N} t'}{P'_{V,P} + P'_{V,N}} \quad (8)$$

$$k = \frac{K_2}{K_1} = \frac{L_1 / (L - L_1)}{\eta_P / \eta_N} \quad (9)$$

式中: L 为相关运算的采样点数; L_1 为电文翻转时的采样点位数; 系数 k 变化趋势非常平缓, 近似等效为常数值。

然而, 由于 Doppler 补偿处理误差对系数 k 存在一定的影响, 以 $t' = 1$ 为例进行分析, 步进量 50 Hz 情况下, 分别在频差 f' 为最大值 25 Hz、最小值 0 Hz 以及中介值 10 Hz 情况下进行分析, 结果如图 4 所示, 可见系数 k 抖动很小, 而且其值接近 1。进一步, 在 -12 dB 信噪比环境下测试, 结果如图 5 所示, 可见虽然存在频差时系数 k 有所抖动, 但抖动较小, 而且以扩频方式转变时间的中间为分界, 其前、后段的抖动量分别相近, 为此其前、后段的系数 k 也分别趋于常值。

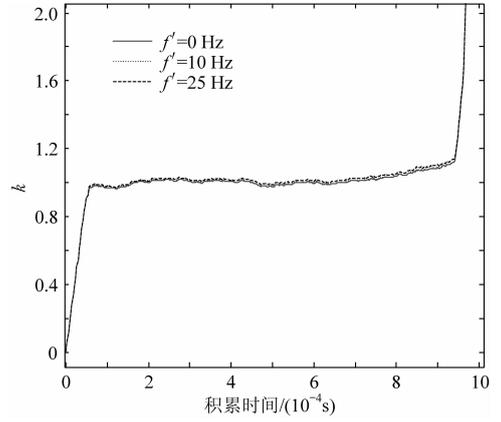


图 4 积累 1 ms 无噪声时 k 系数结果
Fig. 4 k coefficient of 1 ms and no noise

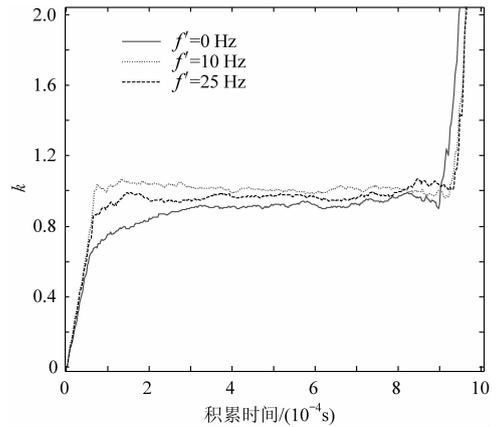


图 5 积累 1 ms 信噪比 -12 dB 时系数 k 结果
Fig. 5 k coefficient of 1 ms and SNR = -12 dB

结合系数 k 对电文翻转位 ρ 进行判定, 可表示为

$$\rho = \frac{k\alpha\eta_P/\eta_N}{k\eta_P/\eta_N + 1} = \frac{kK_1\alpha}{kK_1 + 1} \quad (10)$$

式中: α 为此分段内的采样点数。结合式 (9) 以及系数 k 的变化趋势, 得到 $t' = 1$ 情况下系数 k 为

$$k = \begin{cases} 0.800 & K_1 \leq 1 \\ 1.065 & K_1 > 1 \end{cases} \quad (11)$$

但是, 由于系数 k 的真实值 k' 与理论值 k 存在一定的误差, 因此其解模糊位也存在一定的误差, 其误差和误差率可表示为

$$\Delta\rho = \frac{(k' - k)K_1\alpha}{(k'K_1 + 1)(kK_1 + 1)} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{\Delta\rho}{\alpha} = \frac{(k' - k)K_1}{(k'K_1 + 1)(kK_1 + 1)} \quad (13)$$

进一步, 利用误差率的计算来确定模糊位的确切位置, 以 ρ' 为中心在 $\pm\sigma_{\max}$ 误差范围内进行处理, 将 P 通道本地序列的 $1 \sim \rho' - \sigma_{\max}\alpha$ 片段序列与 N

通道 $\rho' - \sigma_{\max} \alpha + 1 \sim \alpha$ 的片段序列组合成新的长度为 α 的序列,共进行 $2\rho' + \sigma_{\max} \alpha$ 次组合。

对 $2\rho' + \sigma_{\max} \alpha$ 路本地序列与当前分段内的接收序列进行相关运算,并确定最大比例峰值的组合 ρ'' ,由于扩频伪码信号具有良好的自相关特性,组合越接近真实信号的扩频方式,其相关峰值越大,因此其相应的组合 ρ'' 即为真实的电文翻转位,进一步信号的电文扩频方式翻转位的确切位置为 $\rho' + \sigma_{\max} \alpha + \rho''$ 。由此证明,通过解模糊判决处理,可进一步使电文翻转位判决精度从 $(100 \times (1 - t' / (2 \times 40)))\%$ 提高到 100%。

3 有效性分析

3.1 性能分析

利用解模糊位搜索法对 TDDM 裂谱信号进行处理后,可以达到对信号的伪码相位、Doppler 误差以及电文翻转位的判决。

其伪码相位由式(4)及式(5)判定,而经理论推导与测试分析,相关伪码可以达到小于 1 个码片的相位误差。相应的 Doppler 估计值由式(6)计算,经过处理可以达到 Doppler 误差小于 12 Hz 的精度要求。

进一步,在 $K_1 \leq 1$ 及 $K_1 > 1$ 两种情况下对误差率 σ 进行测试,结果如图 6 所示。由图可见,当 $K_1 \leq 1$ 时两通道峰值比例越大,其输出误差率越大,而且当 k' 值越接近理论的 k 值时误差率越小;当 $K_1 > 1$ 时两通道峰值比例越大,其输出误差率越小,同样当 k' 值越接近 k 值时误差率越小。由此表明,当电文翻转位处于相关序列中部时,误差率会最大,其值接近 3% 左右,因此,此时电文翻转位输出精度可达到 97%。进一步,经过 $2\rho' + 3\%L$ 次组合后相关运算,可以使精度达到 100%。

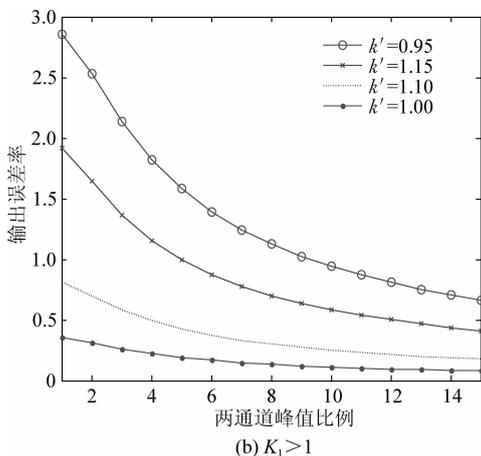
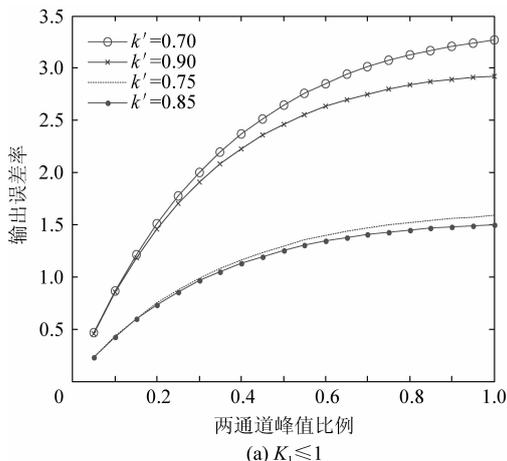


图 6 $K_1 \leq 1$ 和 $K_1 > 1$ 两种情况下 σ 的结果
Fig. 6 σ results based on $K_1 \leq 1$ and $K_1 > 1$

3.2 信噪比容限分析

在积累时间 3 ms,快捕比例门限设为 8,解模糊门限设为 7,当前积累时间内出现同向扩频到逆向扩频的翻转,而且此积累时间内同向扩频时间大于逆向扩频时间情况下,对解模糊位搜索法进行信噪比测试,其中,合路快捕结果与信噪比关系如图 7 所示,可见当信噪比小于 -30 dB 时,比例峰值已低于快捕门限值,即无法达到门限要求,因此进行快捕的有效工作信噪比大于 -30 dB。

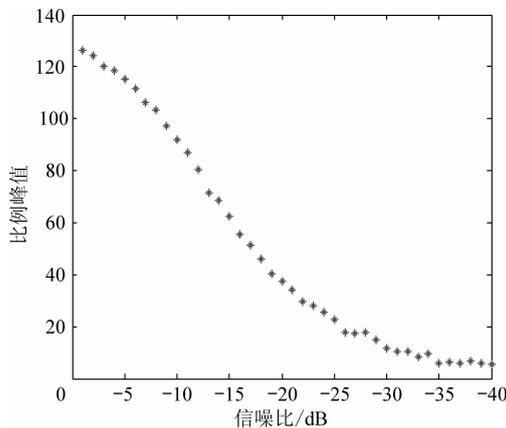


图 7 信噪比与合路快捕结果的关系
Fig. 7 Relationship between SNR and unite-channels fast acquisition result

解模糊位判决结果与信噪比关系如图 8 所示,可见,随着信噪比的减小,虽然 N 通道相关比例峰值下降趋势较快,P 通道相关比例峰值下降趋势很慢,但是,P 通道在信噪比小于 -12 dB 时,比例峰值已低于解模糊门限值,进一步表明,由于解模糊判决处理阶段采用了分段处理方式,相关积累时间较短,因而当某一通道相关度较小

的情况下,信噪比对相关峰值影响较大,因此,为提高解模糊位精度,其处理的有效工作信噪比容限不低于 -12 dB。

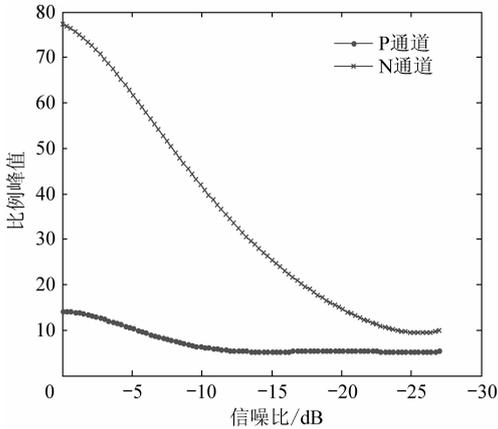


图8 信噪比与解模糊位判决结果的关系

Fig. 8 Relationship between SNR and de-illigibility-judge result

4 结论

提出了解模糊位搜索法,利用该方法对TDDM裂谱信号进行处理后,可以达到对信号的伪码相位误差小于1个码片、Doppler误差小于12 Hz、以及电文翻转位判决精度达到100%的要求。解模糊位搜索法的信噪比测试结果表明,其合路快捕阶段的有效工作信噪比大于 -30 dB,而解模糊位判决阶段的有效工作信噪比大于 -12 dB,因此,为提高解模糊位精度,其处理的有效工作信噪比容限不低于 -12 dB。

参 考 文 献

- [1] Holmes J K, Raghavan S. A summary of the new GPS IIR-M and IIF modernization signals[C]//2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference. 2004, 6: 4116-4126.
- [2] Galileo Open Service Signal in Space Interface Control Document(OS SIS ICD)[S]. Galileo Joint Undertaking, 2006.
- [3] Nunes F, Soua F, Leitao J. Innovations-based code discriminator for GPS/Galileo BOC signals[C]//2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference. 2004, 6: 4127-4131.
- [4] Heing W, Wallner S. MBOC: the new optimized spreading modulation recommended for GALILEO LI OS and GPS LIC[C]//Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006. 2006: 884-892.
- [5] 邱致和. GPS M码信号的BOC调制[J]. 导航, 2005(3): 1-18.
Qiu Zhihe. The BOC modulation of GPS M-code signal [J]. Navigation, 2005(3): 1-18. (in Chinese)
- [6] 徐定杰, 石吉利. 动态环境下基于FFT实现伪码快速捕获[J]. 中国航海, 2003(2): 1-4.
Xu Dingjie, Shi Jili. A FFT-based approach for PN code fast acquisition operation in dynamic situation[J]. Navigation of China, 2003(2): 1-4. (in Chinese)
- [7] Wang B, Kwon H. PN code acquisition using smart antenna for spread spectrum wireless communications part [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(1): 142-149.
- [8] 巴晓辉, 李金海, 陈杰. 一种GPS软件接收机自适应门限快速捕获算法[J]. 信息与控制, 2007, 36(1): 97-101.
Ba Xiaohui, Li Jinhai, Chen Jie. An adaptive threshold algorithm of fast acquisition for software GPS receivers[J]. Information and Control, 2007, 36(1): 97-101. (in Chinese)
- [9] 薛巍, 向敬成, 周治中. 一种PN码捕获的门限自适应估计方法[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1870-1873.
Xue Wei, Xiang Jingcheng, Zhou Zhizhong. An adaptive threshold estimation method for PN code acquisition[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1870-1873. (in Chinese)
- [10] Lin J C. Differentially coherent PN code acquisition with full-period correlation in chip-synchronous DS/SS receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(5): 698-702.
- [11] 王智. 高动态多普勒条件下的扩频接收技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 38-41.
Wang Zhi. The research of receiver in conditions of dynamic Doppler[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007: 38-41. (in Chinese)
- [12] Fischer S, Guerin A, Berberich S. Acquisition concepts for Galileo BOC(2, 2) signals in consideration of hardware limitations[C]//2004 IEEE 59th Vehicle Technology Conference. 2004, 5: 2852-2856.
- [13] 邢兆栋, 张其善, 杨东凯. GALILEO接收机中BOC(1, 1)信号的捕获[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6): 687-690.
Xing Zhaodong, Zhang Qishan, Yang Dongkai. The capture of the BOC(1, 1) signal in the GALILEO receiver [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 687-690. (in Chinese)
- [14] Martin N. BOC(x, y) signal acquisition techniques and performances[C]//Proceedings of ION-GPS 2003. 2003: 188-198.

作者简介:

刘芳(1979—)女,博士研究生,讲师。主要研究方向:空间通信,导航制导。

Tel: 024-24682229

E-mail: onceowned58@tom.com

冯永新(1974—)女,博士,教授。主要研究方向:电子对抗,空间通信。