

文章编号: 1001 - 893X(2012)07 - 1206 - 04

## JTIDS 信号阵列高分辨测向仿真\*

刘 鹏<sup>1</sup>, 吴宏超<sup>1</sup>, 郭 全<sup>2</sup>

(1. 空军航空大学 信息对抗系, 长春 130022; 2. 空军航空大学 仿真技术研究所, 长春 130022)

**摘要:**提出了一种对 JTIDS 信号的高精度测向方法。首先详细分析了 JTIDS 信号的传输特点, 利用 Matlab 生成的 JTIDS 信号, 然后依据空间谱估计中 MUSIC 测向算法的特点, 将接收到的 JTIDS 信号按照脉冲分段, 对单个脉冲所携带的数据进行处理, 最后通过仿真得到不同信噪比环境下多个 JTIDS 信号方位角和俯仰角的估计精度, 验证了该方法的有效性。

**关键词:**JTIDS 信号; 阵列处理; 空间谱估计; MUSIC 算法; 测向; DoA 估计

**中图分类号:**TN82; TN97   **文献标志码:**A   doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.033

## Simulation of Array High Resolution DoA Estimation of JTIDS Signals

LIU Peng<sup>1</sup>, WU Hong-chao<sup>1</sup>, GUO Quan<sup>2</sup>

(1. Information Countermeasure Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;  
2. Institute of Simulation Technology, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A high precision method for DoA (Direction of Arrival) estimation of JTIDS is proposed. The JTIDS signal is generated by Matlab through analysing the transmission characters. Based on the character of MUSIC arithmetic in spatial spectrum estimation, the received JTIDS signal is cut in term of pulse into subsection, and the information in the single pulse is processed. Finally, estimation precision of azimuth and pitching angle of multi-JTIDS signal at different signal-to-noise ratio is obtained by simulation, and the results validate the effectiveness of this method.

**Key words:** JTIDS signal; array processing; spatial spectrum estimation; MUSIC arithmetic; direction finding; DoA estimation

### 1 引言

JTIDS (Joint Tactical Information Distribution System) 是美军 Link16 数据链的终端, 采用高跳频、扩频、纠错编码等多种抗干扰技术。由于其在近些年几场局部战争中所体现出的高效整合战场资源和共享信息的能力, 多个国家和地区也已先后从美军购进该终端并已装配部分作战平台, 使得对 JTIDS 信号侦察和干扰的研究显得尤为迫切。

目前, 国内少有详细针对 JTIDS 信号测向方面的文献与资料。2008 年, 中国电子科技集团公司第三十六研究所的郭细平工程师提出了采用干涉仪体制对 JTIDS 信号进行测向<sup>[1]</sup>, 在信噪比大于 5 dB 时测向精度基本稳定在 2° 以内。然而, 多种抗干扰技

术使得 JTIDS 信号经常工作在负信噪比环境下, 而且该方法方位分辨率不高, 所以显然无法达到实侦要求。近些年来, 空间谱估计技术得到了广泛应用和发展, 其在测向领域的优势也在很多文献中得以论证和体现。本文将利用空间谱估计技术实现对 JTIDS 信号的高精度测向。

### 2 JTIDS 信号模型

JTIDS 信号产生、处理和发射过程如图 1 所示。CCSK 软扩频带来的扩频增益为  $10 \lg(32/5)$  dB。载频在频段 969 ~ 1 008 MHz、1 053 ~ 1 065 MHz 和 1 113 ~ 1 206 MHz 3 个子频段之间伪随机选择, 共 51 个频点, 相邻两跳载频间隔 30 MHz 以上<sup>[2]</sup>。最后信号 MSK 调制后经全向天线发射。

\* 收稿日期: 2011 - 08 - 29; 修回日期: 2012 - 03 - 07

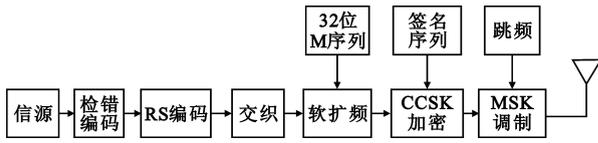


图 1 JTIDS 信号发射流程框图  
Fig.1 Transmitting flow chart of JTIDS

其数学模型可以表示为<sup>[3]</sup>

$$s_k(t) = \cos\phi_k \cos\left(\frac{\pi}{2T_c}t\right)\cos(\omega_k t) - c(t)\cos\phi_k \sin\left(\frac{\pi}{2T_c}t\right)\sin(\omega_k t), \quad kT_c < t < (k+1)T_c \quad (1)$$

式中,  $\omega_k$  为每跳的载波角频率;  $T_c$  为码元宽度;  $\phi_k$  为第  $k$  个码元的载波相位常数, 在该码元持续时间内保持不变;  $c(t)$  为加密后的 CCSK 扩频码, 取值  $\pm 1$ , 分别表示二进制信息 1 和 0; 等式后面的第一项是同相分量, 也称  $I$  分量; 第二项是正交分量, 也称  $Q$  分量;  $\cos(\frac{\pi}{2T_c}t)$  和  $\sin(\frac{\pi}{2T_c}t)$  称为调制函数,  $\cos\phi_k$  是同相分量的等效数据,  $-c(t)\cos\phi_k$  是正交分量的等效数据, 并且同相分量和正交分量之间相差半个载波周期。

### 3 空时阵列模型

基于空时阵列信号处理的空间谱估计是一种新的数字测向技术, 其分辨率突破了瑞利限的限制, 常称为“超分辨率测向”<sup>[4]</sup>。为了充分发挥其特点, 在针对 JTIDS 信号方位检测时, 不仅要考虑其方向特征, 还应具备检测俯仰角的能力, 以此为判断网络平台属性提供一定依据(陆基平台或是空中平台)。所以假设  $M$  元面阵沿  $x$ 、 $y$  轴等距布放, 阵元间距为  $d$  ( $d < \lambda_{\min}/2, \lambda_{\min} = c/f_{\max}$ ), 第一个阵元设为坐标原点。  $N$  个远场窄带平稳信号从不同方向入射, 波达方向为  $(\theta_i, \phi_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), 分别表示方位角和俯仰角, 其中方位角表示与  $x$  轴的夹角, 如图 2 所示。

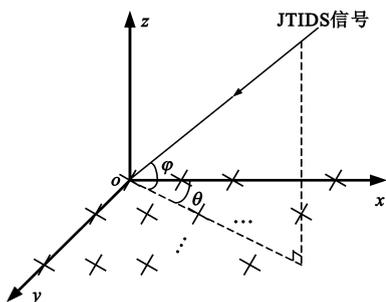


图 2 侦察天线阵示意图  
Fig.2 Sketch map of reconnaissance antenna array

该阵列输出信号为

$$Y(t) = X(t) + N(t) = A(t)S(t) + N(t) \quad (2)$$

式中,  $Y(t) = [y_1(t), \dots, y_M(t)]^T$ ,  $S(t) = [s_1(t), \dots, s_N(t)]^T$ ,  $N(t) = [N_1(t), \dots, N_M(t)]^T$ ;  $A(t)$  为阵列方向矩阵:

$$A(t) = \begin{bmatrix} e^{-j\omega_1\tau_{11}} & e^{-j\omega_2\tau_{12}} & \dots & e^{-j\omega_N\tau_{1N}} \\ e^{-j\omega_1\tau_{21}} & e^{-j\omega_2\tau_{22}} & \dots & e^{-j\omega_N\tau_{2N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_1\tau_{M1}} & e^{-j\omega_2\tau_{M2}} & \dots & e^{-j\omega_N\tau_{MN}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\tau$  为各阵元接收到的信号延迟,

$$\tau = \frac{1}{c}(x \cos\theta_i \cos\varphi_i + y \sin\theta_i \sin\varphi_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N),$$

$\omega_i$  分别为信号  $s_i(t)$  的瞬时角频率。假设信号互不相关, 噪声为方差  $\sigma^2$  的零均值高斯白噪声, 又因为噪声之间以及噪声与信号之间互不相关, 则阵列接收信号  $Y(t)$  的协方差矩阵为

$$R_{YY} = E[YY^H] = AR_{SS}A^H + \sigma^2I \quad (4)$$

### 4 MUSIC 算法在 JTIDS 信号测向中的应用

传统的 MUSIC 算法适用于远场窄带平稳信号的方位估计, 而 JTIDS 信号采用的跳频机制使得无法直接利用 MUSIC 算法进行测向。鉴于此, 可以考虑将接收到的 JTIDS 信号按照脉冲分段, 以单独的脉冲作为参考信号, 在时频分布中可看作一跳, 这样跳频信号在任意一跳就可视为窄带信号, 如图 3 中阴影所示, 时频图所显示的频率为降频后频率。

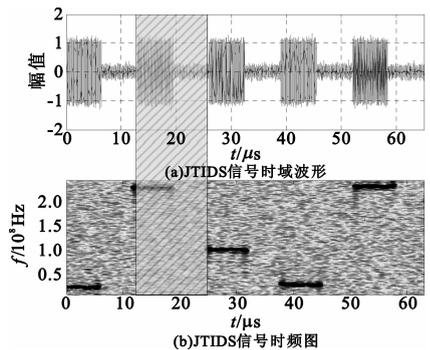


图 3 JTIDS 信号单跳示意图  
Fig.3 Sketch map of single hop in JTIDS

经过分段后, 为了提高硬件处理速度和算法速度, 通常需要利用本振将信号载频降到较低的频率进行处理, 然而此处本振大小的选择需满足降频后的 JTIDS 脉冲信号为窄带信号。若信号带宽为  $B$ , 中心频率为  $f_c$ , 则窄带信号定义为<sup>[5]</sup>:  $B \ll f_c$ , 即相

对带宽  $\frac{B}{f_c} \ll 1$ , 一般  $\frac{B}{f_c} < 0.1$ 。已知 JTIDS 脉冲带宽为 3 MHz, 所以降频后的 JTIDS 信号载频的中心频率  $f_c$  必须大于 30 MHz, 也就是说本振频率必须小于 939 MHz。

经过这两步处理, 就能按照常规空间谱估计算法对接收到的 JTIDS 信号进行方位估计。对式(4)中  $R_{YY}$  进行特征值分解有

$$R_{YY} = U_S \sum_S U_S^H + U_N \sum_N U_N^H \quad (5)$$

式中,  $U_S$  为信号子空间,  $U_N$  为噪声子空间, 之后利用信号子空间的导向矢量  $\mathbf{a}(\theta)$  与噪声子空间正交的特性在谱函数中进行谱峰搜索, 即

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) U_N U_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (6)$$

在 Link16 网络中, 多个平台所组成正交跳频网络自身会尽量避免跳频点的碰撞, 对自身通信造成影响, 所以模型中不考虑相干信号的测向算法。

### 5 仿真实验

在建立仿真模型之前, 首先考虑测向的应用背景, 针对陆基 JTIDS 平台, 由于地球曲率影响必须采用机载侦察单元才能实现对其有效测向, 所以天线阵所占空间必须考虑在内, 同时对于方位角和俯仰角测量精度的需求不同(要求方位精度高, 为干扰提供依据; 俯仰仅可以对目标识别提供一些参考), 仿真中采用  $8 \times 3$  总共 24 根的平面天线阵, 天线间距 12 cm ( $d < 12.44$  cm)。远场 JTIDS 信号分别从  $(60^\circ, 10^\circ)$ 、 $(50^\circ, 5^\circ)$ 、 $(150^\circ, 30^\circ)$  的方向入射到天线阵, 统计采样时间内每个信号的 5 跳信息, 测得每跳载频如表 1 所示, 仿真中随机选取每个 JTIDS 信号的第 2 跳作为信源。本振 900 MHz, 采样频率  $f_s = 2f_{c\text{max}} = 612$  MHz, 谱估计的搜索步长为  $0.5^\circ$ , 在信噪比为 10 dB 的环境下 3 个 JTIDS 信号的测向结果如图 4 所示。

表 1 仿真测得的每跳载频值

Table 1 Carrier frequency of each hop measured by simulation

JTIDS_1		JTIDS_2		JTIDS_3	
原始载频 /MHz	降频后载频 /MHz	原始载频 /MHz	降频后载频 /MHz	原始载频 /MHz	降频后载频 /MHz
1 155	255	996	96	993	93
1 119	219	1 182	282	1 200	300
978	78	1 002	1 140	1 140	240
1 065	165	972	72	1 053	153
999	99	1 125	225	1 191	291

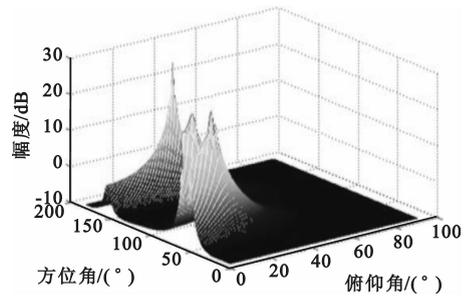


图 4 JTIDS 信号的空间谱图  
Fig.4 Spatial spectrogram of JTIDS

图 4 中谱峰所在位置即为 JTIDS 信号的 DoA 估计值。为了验证算法的准确性, 定义测量均方根误差为

$$RMSE_\theta = \sqrt{E[(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2]}, i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$RMSE_\varphi = \sqrt{E[(\hat{\varphi}_j - \varphi_j)^2]}, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

式中,  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  分别为方位角和俯仰角的均值,  $\hat{\theta}_i$  和  $\hat{\varphi}_i$  分别为方位角和俯仰角的估计值。分别在  $-5 \sim 15$  dB 的信噪比环境下进行 100 次蒙特卡罗实验, 100 测的测量结果平均值作为该信噪比下的测量结果, 得到的均方根误差随信噪比变化的曲线如图 5 所示。

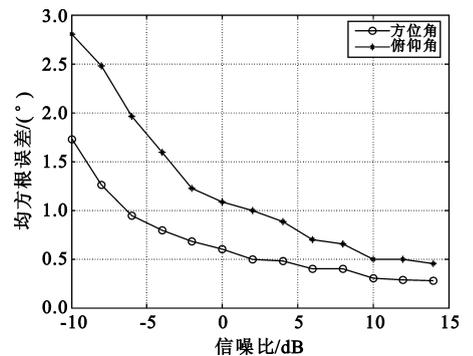


图 5 估计值随信噪比变化曲线  
Fig.5 Curve of estimated value changed with SNR

从图中可以看到, 由于天线阵阵型的原因使得对方位角的估计精度高于对俯仰角的估计精度, 这符合之前文中所述的应用需求。同时通过观察知, 即使在  $-10$  dB 的信噪比下, 对方位角的估计精度约为  $1.7^\circ$ , 对俯仰角的估计精度约为  $2.8^\circ$ ; 当信噪比大于 10 dB 时俯仰角的估计精度在  $0.5^\circ$  以下, 而方位角在信噪比大于 2 dB 时估计精度就已达到  $0.5^\circ$ 。

通过以上方法还可以推出, 本振频率(采样频率)、谱估计搜索步长、天线阵的布局等条件的不同

都会影响测向精度,例如降低本振频率(提高采样频率)或减小谱估计搜索步长或天线阵中采用更多的天线(增大快拍数)都可以提高测向精度,但同样会使估计时间增长,降低测向的实时性,具体过程由于篇幅所限不进行仿真说明。

## 6 结束语

本文在理论和算法上实现了对 Link16 数据链 JTIDS 信号的精确测向,仿真结果说明了该方法并在较低的信噪比下依然呈现良好的测向性能,为侦察装备的设计论证提供了理论依据。目前,对于通信中高速跳频电台的测向依然还存在很多困难,在现实侦收环境中还要依赖 JTIDS 信号检测性能、硬件处理速度和设备兼容情况等其他条件,这也是下一步研究工作的重点所在。

## 参考文献:

- [1] 郭细平.一种 JTIDS 信号测向新方法[J].通信对抗,2008(2):19-21.  
GUO Xi-ping. A new direction finding method for JTIDS [J]. Communication Countermeasures, 2008 (2): 19-21. (in Chinese)
- [2] Wilson W J. Communication for Network-Centric Operations: Creating the Information Force [C]//Proceedings of 2001 IEEE Military Communication Conference. Tysons Corner, McLean, Virginia, USA: IEEE, 2001: 1-7.
- [3] Chi-Han Kao. Performance Analysis of a JTIDS/Link-16-type Waveform Transmitted over Slow, Flat Nakagami Fad-

ing Channels in The Presence of Narrowband Interference [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2008.

- [4] 王永良,陈辉,彭应宁,等.空间谱估计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2004.  
WANG Yong-liang, CHEN Hui, PENG Ying-ning, et al. Theory and arithmetic of spatial spectrum estimation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 黄可生.宽带信号阵列高分辨处理技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005:9-10.  
HUANG Ke-sheng. Research on high resolution processing of wideband array signal [D]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2005: 9-10. (in Chinese)

## 作者简介:

刘鹏(1982—),男,辽宁丹东人,2008年获硕士学位,现为讲师,主要从事通信对抗方面的研究;

LIU Peng was born in Dandong, Liaoning Province, in 1982. He received the M.S. degree in 2008. He is now a lecturer. His research concerns communication countermeasure technology.

Email: m-zixu-j@163.com

吴宏超(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,2008年获硕士学位,现为讲师,主要从事电子对抗侦察方面的研究;

WU Hong-chao was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1982. He received the M.S. degree in 2008. He is now a lecturer. His research concerns electronic countermeasure reconnaissance technology.

郭全(1982—),男,山西大同人,2008年获硕士学位,现为讲师,主要从事军事仿真技术研究。

GUO Quan was born in Datong, Shanxi Province, in 1982. He received the M.S. degree in 2008. He is now a lecturer. His research concerns military simulation technology.