

文章编号: 2095-4980(2018)03-0412-07

## 脉冲积累对双点源干扰影响分析

付孝龙<sup>1</sup>, 白渭雄<sup>\*1</sup>, 李欣<sup>1</sup>, 陈津津<sup>2</sup>

(1.空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2.中国人民解放军 94921 部队, 福建 晋江 362200)

**摘要:** 双点源干扰是一种针对单脉冲雷达的有效角度欺骗干扰技术。现有文献均在单次回波情况下分析双点源相干及非相干情况下的干扰效果。而实际情况下, 雷达在进行数据处理时, 会进行脉冲积累处理, 此时双点源干扰两点源信号间的相位会受到脉冲积累的影响, 进而影响干扰效果。通过仿真分析, 得出了脉冲积累处理下, 单脉冲雷达受双点源干扰欺骗的角度不再稳定, 而是在一定范围内波动的结论。

**关键词:** 单脉冲雷达; 双点源干扰; 角度欺骗; 脉冲积累

中图分类号: TN975

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0412

## Analysis of pulse accumulation on dual-source jamming

FU Xiaolong<sup>1</sup>, BAI Weixiong<sup>\*1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, CHEN Jinjin<sup>2</sup>

(1.School of Air and Missile Defence, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710051, China;  
2.Unit 94921 of the PLA, Jinjiang Fujian 362200, China)

**Abstract:** Dual-source jamming is an effective monopulse radar jamming method. The jamming effect is analyzed under the condition of single echo. But in the actual situation, pulse accumulation is utilized in signal processing which would affect the phase between the dual-source jammers and finally affect the dual-source jamming effect. Simulation analysis indicates the deception angle of monopulse radar under dual-source jamming fluctuates in some range instead of keeping stable.

**Keywords:** monopulse radar; dual-source jamming; angle deception; pulse accumulation

单脉冲雷达因采用同时多波束技术<sup>[1]</sup>而使得自卫式干扰对其测角系统不起作用。因此, 双点源干扰出现并成为干扰单脉冲雷达的有效方法。现有文献针对双点源干扰效果的分析中, 主要集中在两点源功率、张角、相位差等对角度欺骗干扰效果的影响<sup>[2-4]</sup>以及两点源与跟踪系统间动态特性分析<sup>[5-6]</sup>。上述针对双点源欺骗干扰效果的分析中, 均未考虑脉冲积累对双点源干扰的影响。本文在经典双点源干扰分析的基础上, 探讨了脉冲积累处理对双点源干扰效果的影响。

### 1 双点源干扰下单脉冲雷达角度跟踪模型

设单平面内二干扰源与振幅和-差单脉冲雷达的波束位置关系如图 1 所示。

天线左右波束接收到的信号  $E_1(\theta)$  和  $E_2(\theta)$  为:

$$E_1(\theta) = E_{m1}F_1(\theta_1)\exp j(\omega t + \varphi_{m1}) + E_{m2}F_1(\theta_2)\exp j(\omega t + \varphi_{m2}) = E_{m1}F(\theta_1 - \theta_0)\exp j(\omega t + \varphi_{m1}) + E_{m2}F(\theta_2 - \theta_0)\exp j(\omega t + \varphi_{m2}) \quad (1)$$

$$E_2(\theta) = E_{m1}F_2(\theta_1)\exp j(\omega t + \varphi_{m1}) + E_{m2}F_2(\theta_2)\exp j(\omega t + \varphi_{m2}) = E_{m1}F(\theta_1 + \theta_0)\exp j(\omega t + \varphi_{m1}) + E_{m2}F(\theta_2 + \theta_0)\exp j(\omega t + \varphi_{m2}) \quad (2)$$

式中:  $E_{m1}, E_{m2}$  分别为点源 1(诱饵干扰)和点源 2(目标回波)的信号振幅;  $\theta_1, \theta_2$  分别为点源 1 和点源 2 相对天线等信号轴的角位置;  $\varphi_{m1}, \varphi_{m2}$  分别为点源 1 和点源 2 在雷达天线口面处的相位, 其差为  $\Delta\varphi = \varphi_{m1} - \varphi_{m2}$ 。

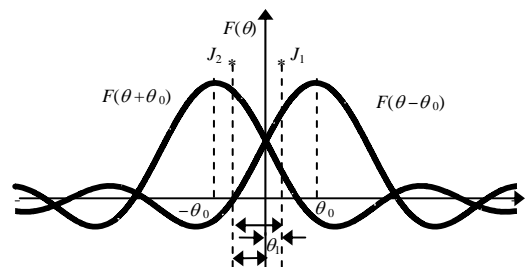


Fig.1 Location of dual-source jammers and radar beams  
图 1 两干扰源与雷达波束的位置关系

则单脉冲雷达和差器输出的和信号及差信号分别为：

$$E_{\Sigma}(\theta) = (E_1(\theta) + E_2(\theta)) / \sqrt{2} = \{E_{m1}[F(\theta_1 - \theta_0) + F(\theta_1 + \theta_0)] \exp j(\omega t + \varphi_{m1}) + E_{m2}[F(\theta_2 - \theta_0) + F(\theta_2 + \theta_0)] \exp j(\omega t + \varphi_{m2})\} / \sqrt{2} \quad (3)$$

$$E_{\Delta}(\theta) = [E_1(\theta) - E_2(\theta)] / \sqrt{2} = \{E_{m1}[F(\theta_1 - \theta_0) - F(\theta_1 + \theta_0)] \exp j(\omega t + \varphi_{m1}) + E_{m2}[F(\theta_2 - \theta_0) - F(\theta_2 + \theta_0)] \exp j(\omega t + \varphi_{m2})\} / \sqrt{2} \quad (4)$$

经自动增益控制和相位检波后的单脉冲比为：

$$S_{\Delta}(\theta) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{E_{\Delta}(\theta)}{E_{\Sigma}(\theta)} \right\} = \frac{\operatorname{Re}\{E_{\Sigma}(\theta) \cdot E_{\Delta}^*(\theta)\}}{E_{\Sigma}(\theta) \cdot E_{\Delta}^*(\theta)} = \frac{E_{\Sigma_i} E_{\Delta_i} + E_{\Sigma_e} E_{\Delta_e}}{|E_{\Sigma}|^2} = \frac{\frac{E_{m1}^2[F^2(\theta_1 - \theta_0) - F^2(\theta_1 + \theta_0)] + E_{m2}^2[F^2(\theta_2 - \theta_0) - F^2(\theta_2 + \theta_0)]}{E_{m1}^2[F(\theta_1 - \theta_0) + F(\theta_1 + \theta_0)]^2 + E_{m2}^2[F(\theta_2 - \theta_0) + F(\theta_2 + \theta_0)]^2} + \frac{2E_{m1}E_{m2}[F(\theta_1 - \theta_0)F(\theta_2 - \theta_0) - F(\theta_1 + \theta_0)F(\theta_2 + \theta_0)] \cos(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})}{2E_{m1}E_{m2}[F(\theta_1 - \theta_0) + F(\theta_1 + \theta_0)][F(\theta_2 - \theta_0) + F(\theta_2 + \theta_0)] \cos(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})}}{\cos \varphi} \quad (5)$$

由式(5)知单脉冲雷达所测得的角度值为两点源角度的合成值，不能反映任一点源的角度位置，即单脉冲雷达在角度上受到了欺骗干扰，且雷达跟踪角大小及方向与两点源的能量、张角 $\Delta\theta$ 、相位差等因素有关。

## 2 脉冲积累对双点源干扰影响分析

依据一次单脉冲探测期间主瓣波束内的 2 个信号在到达天线口面时的相位关系，将双点源干扰分为相干干扰和非相干干扰<sup>[7]</sup>。其中双点源非相干干扰定义为，单脉冲雷达主瓣内 2 个信号到达天线口面时相互之间没有稳定的相位关系；双点源相干干扰定义为，单脉冲雷达主瓣内 2 个信号到达天线口面时相互之间具有稳定的相位关系（相参信号）。

当只利用单次脉冲观测结果进行角度测量时，双点源干扰信号之间的相位关系完全由信号到达天线口面处的相位决定，即此情况下的双点源干扰是相干干扰还是非相干干扰仅由单脉冲天线口面处的信号是否具有稳定的相位关系决定。然而，在利用多个观测脉冲时，信号处理机对多个脉冲进行积累处理，积累可以在相位检波前完成，也可以在相位检波后完成。若对回波脉冲进行检波前积累，等效于对接收到的两点源信号分别进行矢量合成，显然，进行脉冲积累后，两点源间功率比及相位差与脉冲积累前的任一回波内两点源的功率比及相位差均不同，从而使得欺骗角度不同；若对回波进行检波后积累，即先对每个脉冲分别估计出对应的角误差信号，然后再求这些角误差信号的均值，这一处理亦会使得脉冲积累处理后的欺骗角度发生变化。

## 3 仿真分析

本节仿真分析无脉冲积累及脉冲积累 2 种情况下双点源干扰单脉冲雷达跟踪角变化情况，以此进一步说明脉冲积累对双点源干扰角度欺骗效果的影响。

### 3.1 无脉冲积累处理下双点源干扰

仿真参数如下：单脉冲雷达天线波束方向图采用文献[8]辛克函数，表达式为  $F(q) = \frac{\sin(50\pi \sin q)}{50\pi \sin q}$ ，波束偏角  $\theta_0 = 0.2^\circ$ ，振幅比以  $a$  表示 ( $a = E_{m1}/E_{m2}$ )，功率比用  $b = 20 \log a$  (dB) 来计算，变化范围为  $-20 \sim 20$  dB，相位差变化范围为  $V_{\varphi} = \varphi_{m1} - \varphi_{m2} = 0 \sim 180^\circ$ ，诱饵与目标对雷达形成的张角为  $0.3^\circ$ ，诱饵与目标角度位置分别为  $\theta_1 = 0.15^\circ, \theta_2 = -0.15^\circ$ 。

#### 1) 仿真例 1：功率因素对双点源干扰的影响

图 2 为双点源相位差  $\varphi$  依次为  $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 180^\circ$  条件下双点源功率比变化时，单脉冲雷达跟踪角变化曲线。由图 2(a) 知当相位差小于  $90^\circ$  时，不论双点源功率比如何变化，单脉冲雷达只存在一个始终位于双点源之间的跟踪角，且跟踪角靠近功率较大的点源。当双点源相位差为  $120^\circ$  时，单脉冲雷达跟踪角也只有一个，但此时随着功率比的变化，跟踪角可能位于双点源之内，也可能位于双点源之外。当相位差为  $150^\circ, 160^\circ, 180^\circ$  时，跟踪角可能位于双点源之内，也可能位于双点源之外，且在一定的功率比范围内可能同时存在多个跟踪点。图 2(b) 与文献[4]描述的相干双点源干扰现象相一致：当两点源干扰相位差为  $180^\circ$  左右时，可使得单脉冲跟踪雷达跟踪于双点源之外的 2 个虚假点源处。

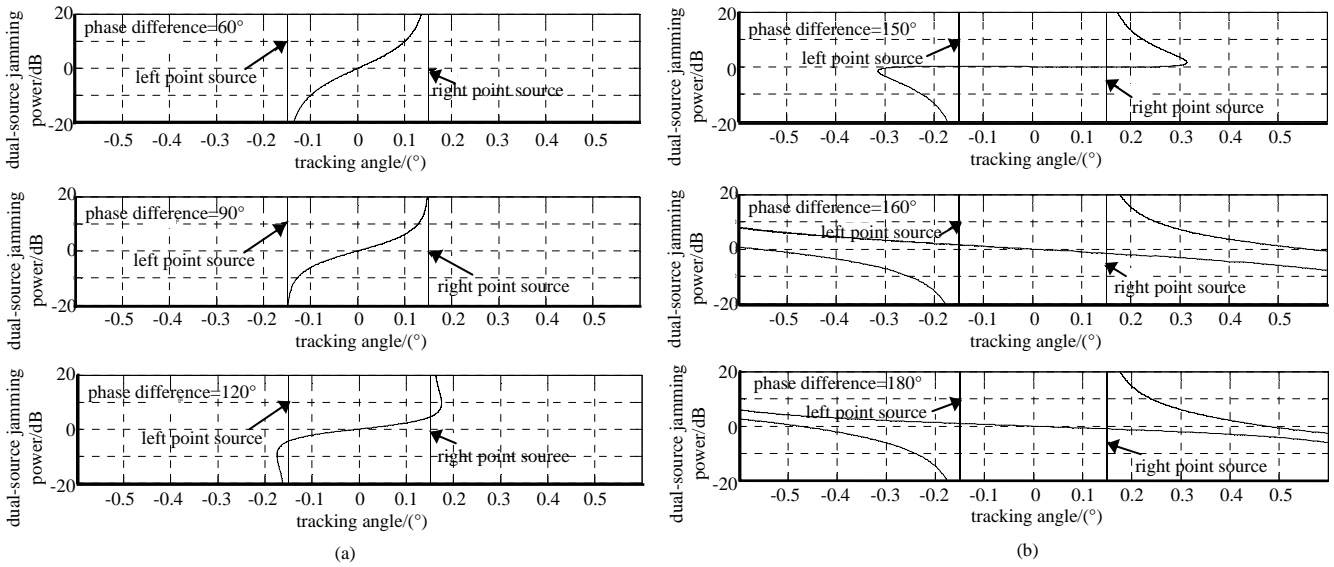


Fig.2 Tracking angle varies with the change of dual-source jamming power  
图 2 双点源功率比变化时雷达跟踪角变化曲线

2) 仿真例 2: 相位差对双点源干扰的影响

由仿真例 1 知不同的两点源相位差下, 雷达跟踪角的位置及稳定跟踪点的数目亦产生相应的变化, 本例仿真研究相位差对双点源干扰的影响。

由图 3 知功率比为 0 dB, 相位差小于 150°及大于 210°时单脉冲雷达跟踪角始终位于两点源中心, 这与图 2 相同情况下结果一致, 相位差位于 150°~210°范围时单脉冲雷达有 3 个跟踪点, 中间一个为不稳定跟踪点, 两侧为稳定跟踪点, 在相位差为 180°时两侧稳定跟踪点离两点源中心最远, 且此时 2 个跟踪点都位于两点源之外; 功率比为 1 dB, 相位差位于 150°~210°时, 单脉冲雷达有 3 个跟踪点, 中间一个为不稳定跟踪点, 两侧为稳定跟踪点, 在相位差为 180°时两侧稳定跟踪点离两点源中心角度小于功率比为 0 dB 情况, 但此时 2 个跟踪点仍位于两点源之外; 功率比为 10 dB 时, 单脉冲雷达只有 1 个跟踪点, 且在相位差为 180°时跟踪点离两点源中心最远, 位于两点源以外靠近强点源一侧。

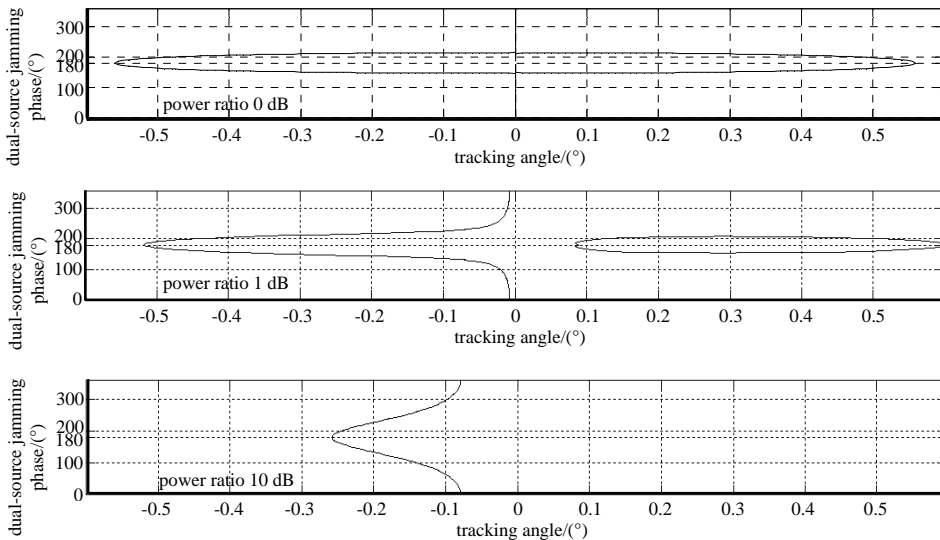


Fig.3 Tracking angle varies with the change of dual-source jamming phase  
图 3 双点源相位差变化时雷达跟踪角变化曲线

3.2 脉冲积累处理下双点源干扰仿真分析

1) 仿真例 3: 脉冲积累对非相干双点源干扰影响

仿真参数: 左右点源角位置分别为 0.35°和-0.35°, 两点源信号相位变化服从零均值正态分布, 功率比见仿

真图例，单次处理脉冲积累数为 10，蒙特卡罗仿真次数为 50，其余仿真参数同 3.1 节。

图 4 为先进进行脉冲积累后求跟踪点角度的单脉冲跟踪点变化曲线。由图知，进行脉冲积累处理后单脉冲受欺骗跟踪点位置在一定范围内波动。图 4(a)对应两点源能量相当，因此跟踪点在左右点源附近均有跟踪点，而在图 4(c)中，由于两点源能量差别较大，跟踪点在靠近强点源(图中对应左点源)一侧波动。

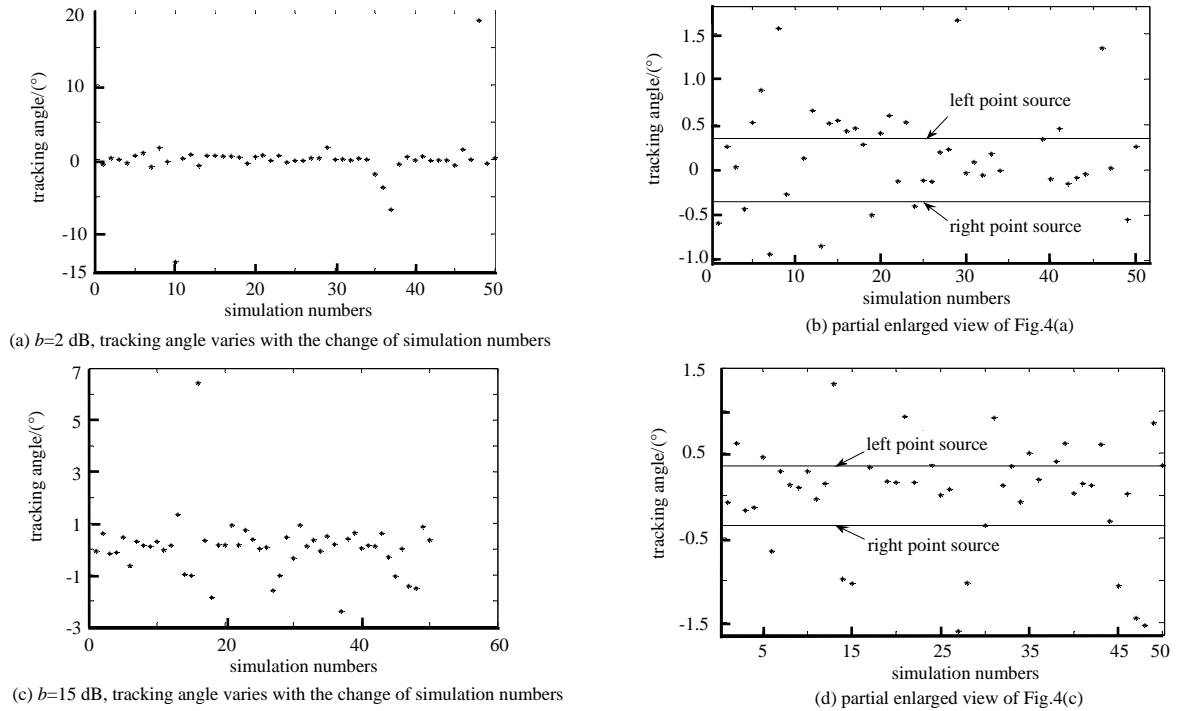


Fig.4 Angle estimation after pulse accumulation

图 4 先脉冲积累后求角度

图 5 为先对各脉冲求角度后再求角度的均值获得的跟踪点变化曲线。由图知，进行脉冲积累处理后单脉冲受欺骗跟踪点位置也在一定范围内波动。图 5(a)对应两点源能量相当，因此跟踪点在左右点源附近均有跟踪点，而在图 5(c)中，由于两点源能量差别较大，跟踪点在靠近强点源(图中对应左点源)一侧波动。

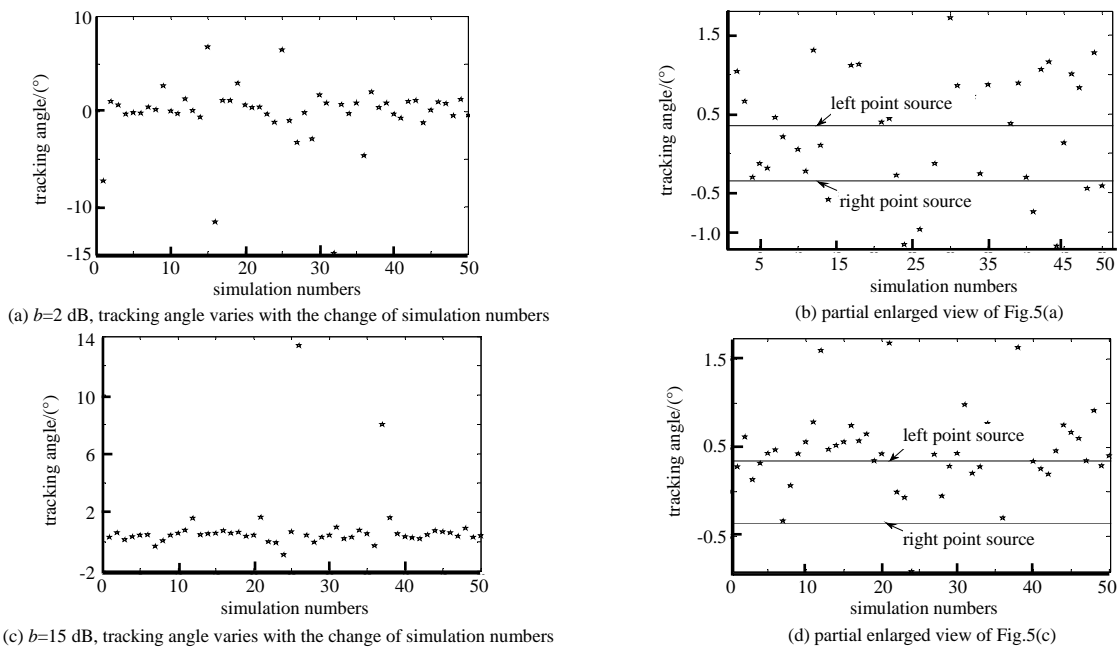


Fig.5 Angle estimation before pulse accumulation

图 5 先求角度后积累平均

2) 仿真例 4: 脉冲积累对相干双点源干扰的影响

仿真参数: 左右点源角位置分别为  $0.35^\circ$ 和 $-0.35^\circ$ , 两点源相位差及幅度比见仿真图, 单次处理脉冲积累数为 10, 蒙特卡罗仿真次数为 50, 其余仿真参数同 3.1 节。

仿真例 4 研究脉冲积累对相干双点源干扰的影响。图 6、图 7 为 2 种不同脉冲积累处理方法下, 单脉冲跟踪点被诱骗情况, 由图分析知 2 种情况下, 两点源相位差为  $180^\circ$ 时脉冲积累对相干双点源干扰效果无影响, 单脉冲跟踪角始终稳定。

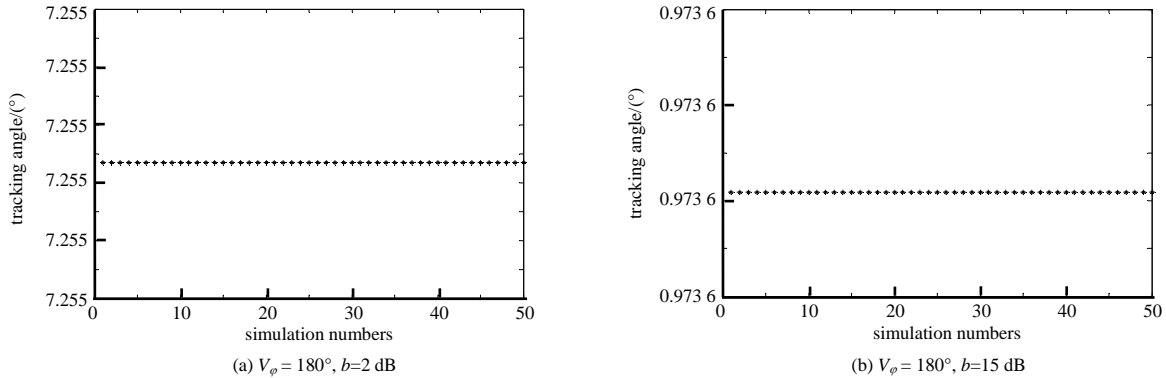


Fig.6 Tracking angle varies with the change of jammer power with angle estimation after pulse accumulation processing  
图 6 先积累后求角度, 跟踪角随仿真次数变化情况

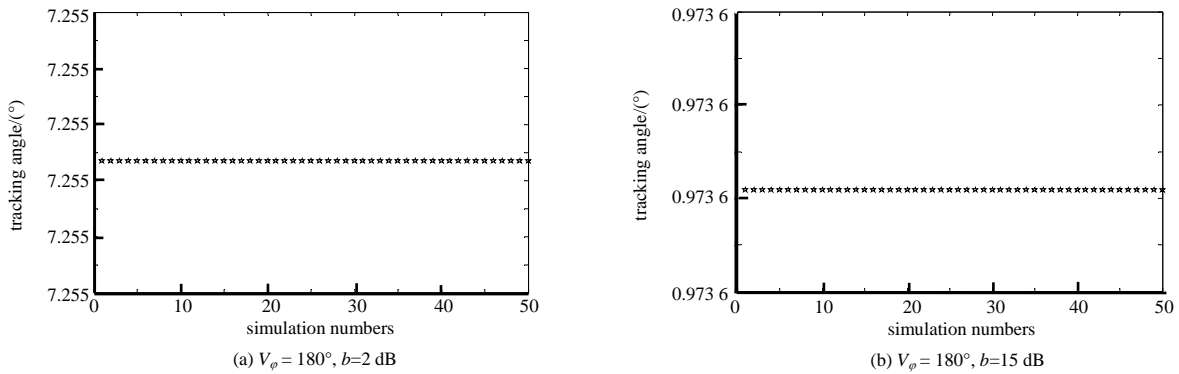


Fig.7 Tracking angle varies with the change of jammer power with angle estimation before pulse accumulation processing  
图 7 先求角度后积累平均, 跟踪角随仿真次数变化情况

由图 8~图 10 知, 当相干两点源相位差不为  $180^\circ$ 时, 脉冲积累处理会使单脉冲跟踪点产生波动, 且 2 种脉冲积累处理情况下, 随着两点源幅度比的增大, 单脉冲跟踪点偏向能量较大一侧。

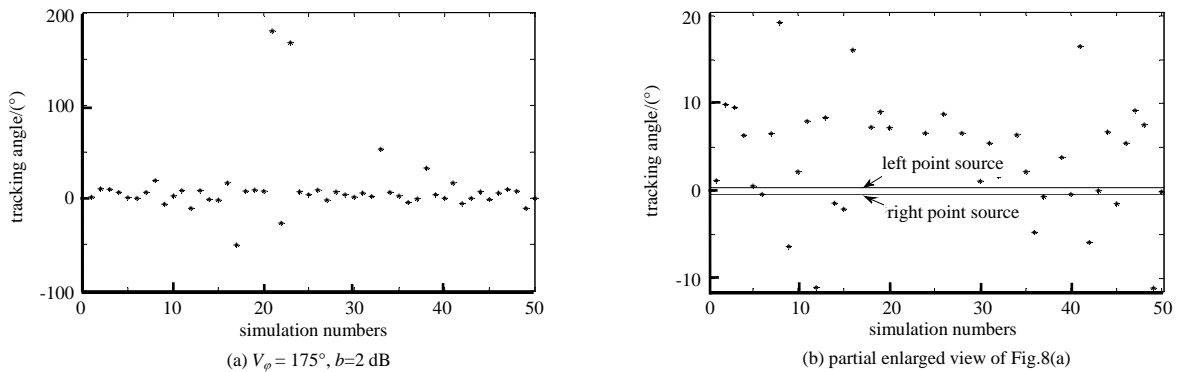


Fig.8 Tracking angle varies with the simulation times(first accumulating then calculating the angle)  
图 8 先积累后求角度, 跟踪角随仿真次数变化情况

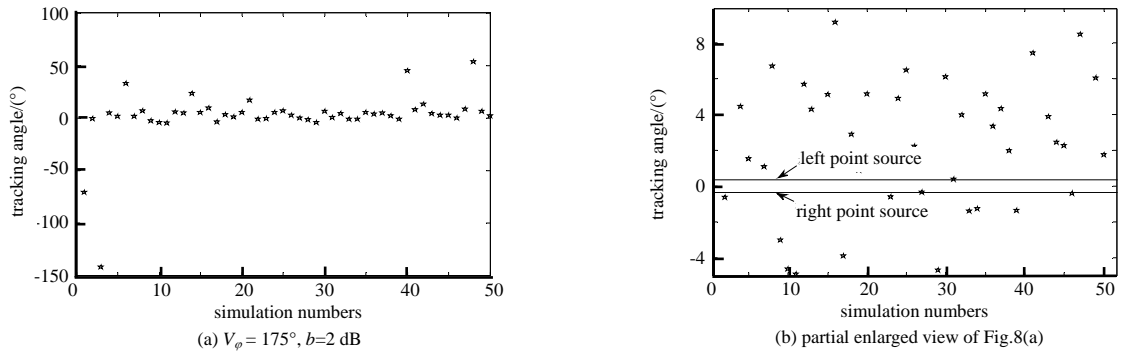


Fig.9 Tracking angle varies with the simulation times(first calculating the angle then accumulating)  
图 9 先求角度后积累平均，跟踪角随仿真次数变化情况

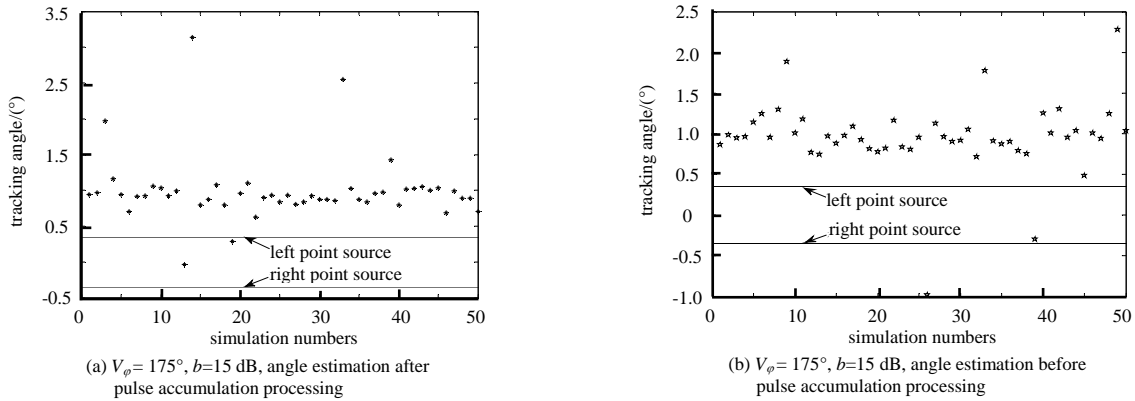


Fig.10 Tracking angle varies with the simulation times under different pulse accumulation processing  
图 10 不同脉冲积累方式下，跟踪角随仿真次数变化情况

#### 4 结论

脉冲积累处理使得双点源干扰两点源信号间功率比和相位差发生了改变，从仿真分析知：

- 1) 脉冲积累处理对非相干和相干双点源的干扰效果的影响是不同的；
- 2) 在雷达采用积累处理后，双点源非相干干扰同样可以产生两点源角度以外的干扰角度，但是所产生的干扰效果不像相干干扰那么稳定，而是使得雷达在每次处理后会受不同欺骗角度的影响，使跟踪轴产生波动，即脉冲积累处理会使得双点源角度欺骗干扰角不稳定；
- 3) 双点源相干干扰相位差为 180°时，脉冲积累处理不会对干扰效果产生影响，当相位差偏离 180°时，脉冲积累处理会使得欺骗角度不稳定，但欺骗角在能量较强点源一侧。

#### 参考文献：

[ 1 ] ULRICH Nickel,FGAN Fhr. Overview of generalized monopulse estimation[J]. IEEE A&E Systems Magazine, 2006,21(6): 27-56.

[ 2 ] 杨立明,吕涛,陈宁. 相干两点源对比单脉冲测角的干扰机理分析[J]. 弹箭与制导学报, 2012,32(3):209-212. (YANG Liming,LYU Tao,CHEN Ning. Analysis of interference elements of coherent dual-sources to phase-comparison angle tracking of monopulse[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012,32(3):209-212.)

[ 3 ] 尚志刚,白渭雄,付孝龙. 双点源干扰对抗主动寻的导弹有效方法[J]. 现代防御技术, 2013,41(2):102-106. (SHANG Zhigang,BAI Weixiong,FU Xiaolong. Effective countermeasure of dual-source jamming to target-seeking missile[J]. Modern Defence Technology, 2013,41(2):102-106.)

[ 4 ] 耿艳,白渭雄,苗松娟. 两点源对单脉冲雷达角度欺骗干扰的仿真与分析[J]. 火力与指挥控制, 2010,35(7):151-154. (GENG Yan,BAI Weixiong,MIAO Songjuan. Simulation and analysis of the angle deception jamming of dual sources on monopulse radar[J]. Fire Control&Command Control, 2010,35(7):151-154.)

[ 5 ] 马东立,刘亚枫,林鹏. 航空拖曳诱饵系统的动态特性研究[J]. 航空学报, 2014,35(1):161-170. (MA Dongli,LIU Yafeng,

- LIN Peng. Study of dynamic characteristics of aeronautic towed decoy system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014,35(1):161-170.)
- [6] 宋志勇,苏剑,付强. 拖曳式诱饵干扰机理及其时频特性分析[J]. 航天电子对抗, 2016,31(1):46-51. (SONG Zhiyong, SU Jian,FU Qiang. Jamming principle and time-frequency characteristic of towed radar active decoy[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2016,31(1):46-51.)
- [7] 张永顺,童宁宁,赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2010. (ZHANG Yongshun,TONG Ningning, ZHAO Guoqing. Radar electronic warfare principle[M]. 2nd ed. Beijing:National Defense Industry Press, 2010.)
- [8] 李思奇. 高分辨单脉冲雷达距离像回波建模仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):186-189. (LI Siqi. Modeling and simulation of high resolution monopulse radar range profile echo[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):186-189.)

#### 作者简介:



付孝龙(1988-), 男, 成都市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为雷达电子战.email: fuxiaolong\_12@163.com.

白渭雄(1960-), 男, 陕西省清涧县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达电子战。

李欣(1989-), 男, 河南省南阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为雷达抗干扰新技术。

陈津津(1987-), 男, 江苏省南通市人, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为雷达电子战。

## 中国电子学会电路与系统分会第二十九届学术年会征文通知

中国电子学会第二十九届电路与系统学术年会将于2018年8月19~23日在长春理工大学召开。会议由中国电子学会电路与系统分会主办, 长春理工大学承办。我们真诚地邀请电路与系统及相关领域的科研工作者莅临本次年会! 现将会议有关事项通知如下:

**征文要求:** 具体要求请见网站[www.iaeej.com](http://www.iaeej.com)

**论文提交:** 采用中科院国际会议服务平台<http://cscas29.csp.escience.cn/>参考会议详细信息。投稿请将论文发送到邮箱[cscas@mail.ie.ac.cn](mailto:cscas@mail.ie.ac.cn)。

**重要日期:** 提交论文截止日期: 2018年7月1日; 通知论文接收日期: 2018年7月20日; 提交论文修改稿日期: 2018年7月31日

**论文评奖:** 具体要求请见网站[www.iaeej.com](http://www.iaeej.com)

#### 联系方式:

电路与系统分会办公室联系人: 刘团结、陈倩 电话: (010) 58887538

长春理工大学联系人: 刘云清 电话: (0431) 85582269

会议邮箱: [cscas@mail.ie.ac.cn](mailto:cscas@mail.ie.ac.cn)

会议网址: <http://cscas29.csp.escience.cn/>

#### 会议地点:

会场地点: 长春理工大学教学楼

报到及住宿地点: 新华苑宾馆(长春市卫星路7186号)