激光测距中 APD 阵列探测信噪比分析

薛 莉[1],翟东升[2],李祝莲[2],李语强[2],熊耀恒[2],李 明[1]

(1. 北京跟踪与通信技术研究所 空间目标测量重点实验室,北京 100094;
2. 中国科学院云南天文台,云南 昆明 650011)

摘 要: APD 阵列可提高光子探测效率,然而在回波探测概率提高的同时提高噪声探测概率,因此需合理选择阵列单元数以提高探测信噪比。根据回波和噪声在距离门内的分布情况,结合光子探测概率,建立了盖革模式下 APD 阵列探测信噪比随阵列单元数的变化模型。讨论了回波光子数、背景噪声强度、回波在门控内位置、占空比等因素对探测信噪比的影响。分析结果表明,提高回波光子数、探测器占空比、轨道预报精度有助于增加 APD 阵列的探测信噪比;4 元 APD 阵列适用于回波光子数小于 0.1、门控内噪声光子数小于 1 的观测情况,而回波和噪声强度较强时,25 元 APD 阵列能够取得相对较优的探测信噪比。建立的 APD 阵列探测信噪比模型有助于快速选择 APD 阵列单元数以达到较高探测信噪比。

关键词: 激光测距; APD 阵列; 探测信噪比; 探测概率; 占空比

中图分类号: P228.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0306001

Signal-to-noise ratio analysis on APD arrays in laser ranging

Xue Li[1], Zhai Dongsheng[2], Li Zhulian[2], Li Yuqiang[2], Xiong Yaoheng[2], Li Ming[1]

(1. Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China; 2. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

Abstract: APD arrays provide an efficient method for photon detection probability improvement. However, the noise detection probability increases as well as the echo detection probability. Properly choosing the unit number of APD arrays means a lot for signal-to-noise ratio (SNR) improvement. In this article, according to the photon detection probability in the Geiger-mode, the SNR model with the unit number N was established based on the distribution of echoes and noise within the range gate. Effects of number of echoes, noise rate, location of echoes and fill factor were discussed. Analytical results show that larger number of echoes, higher fill factor and more precise orbit prediction help increase the SNR with APD arrays. 4-unit APD arrays are enough for laser ranging with echo number smaller than 0.1 and noise number within the range gate smaller than 1, while when there are large number of echoes and noise, 25-unit APD arrays will achieve a better SNR. The established SNR model for APD arrays will help for proper unit number selection to achieve the best SNR.

Key words: laser ranging; APD arrays; signal-to-noise ratio; detection probability; fill factor

收稿日期: 2016-07-08; **修订日期:** 2016-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(U1431116);国家 863 高技术研究发展计划(2011AAXXX0110)

作者简介: 薛莉(1990-),女,工程师,硕士,主要从事漫反射激光测距技术方面的研究。Email:xuelishirley1129@163.com

0 引 言

激光测距作为空间目标单次测量精度最高的一种方式，已被广泛应用于卫星定轨[1-3]、空间碎片监测[4-6]、大地测量[7-8]等领域中。出射激光能量经远距离双程传输后被大量衰减，最终由探测器接收到的非合作目标回波光子数往往为单光子水平。目前常用的激光测距探测器为具有单光子灵敏度的盖革模式雪崩探测器 (Geiger-mode Avalanche Photodiode, Gm-APD)，该探测器因光子承受能力低、暗计数速率随工作重复频率急剧增加[9]等特点，往往需工作在门控模式，每脉冲周期内仅允许一次光子测量。在 Gm-APD 探测过程中，提前到达探测面的天光背景噪声可能会引起探测器触发，而无法响应后续到达的目标回波光子，Gm-APD 这种遇到光子随即“关门”的特性容易导致噪声“致盲”问题，限制了回波的探测概率[10]。

APD 阵列的诞生为提高光子探测效率提供了一种可能，2002 年美国麻省理工学院林肯实验室首次将 4×4 的 APD 阵列应用在激光测距及三维成像中[11]，并成功获得汽车和椎体目标的距离及图像，随后使用林肯实验室专门研制的 4×4APD 阵列实现了激光测月。2005 年，Henriksson[12]分析了单个 APD 的探测概率，并讨论了激光能量、噪声强度、回波到达时刻等因素对其的影响。2008 年，国内寇松峰等人[13]利用 4 元 APD 阵列实现了低激光发射功率下的高精度激光测距。2012 年，哈尔滨工业大学徐璐等人[14]分析了单元 APD 多个脉冲累积对探测性能的提高作用，并在 2015 年[15]对比了单元 APD 进行 4 次脉冲累积和 4 元 APD 进行单次探测的性能，表明阵列 APD 相比于累积探测的单元 APD 具有更高探测概率。Luo 等人[16]进一步分析了 APD 阵列的最大作用距离，翟东升等人[17]则讨论了阵列单元数对信号锐度的影响。然而，上述研究并没有考虑阵列 APD 占空比对探测性能的影响，也没有给出不同观测条件下探测信噪比随阵列单元数的变化。因 APD 阵列制作工艺限制，各单元间存在一定间隙以减小串扰信号的影响，占空比的存在引起了光斑能量的损失；另一方面，APD 阵列在增加回波探测概率的同时也增加了对背景噪声的探测概率。因此，在考虑 APD 阵列探测性能时需要综合考虑上述因素。

文中从回波光子和噪声光子分布出发，将门控时间内光子划分为回波区间、回波前噪声区间以及回波后噪声区间三部分，根据光电转换的泊松特性获得回波探测概率和噪声探测概率，并由探测信噪比的统计表达式推导得到盖革模式下阵列 APD 的探测信噪比。由建立的信噪比模型出发，分别讨论了回波强度、天光背景噪声强度、回波位置、占空比等因素对探测信噪比的影响。建立了随阵列单元数变化的探测信噪比模型，有助于针对不同观测条件合理选择使探测信噪比获得提升的阵列单元数，对于激光测距系统设计和探测器选择具有重要意义。

1 APD 阵列探测原理及信噪比建模

1.1 APD 阵列探测原理

激光测距系统中，目标回波以及天光背景噪声被望远镜接收后到达探测器探测面，经光电转换后产生电信号被后端事件计时器所记录，如图 1 所示。在实际激光测距中，往往采用主动抑制方式，捕捉 APD 雪崩脉冲的上升沿并产生同步可鉴别输出，同时将 APD 两端偏压降到雪崩电压以下，从而抑制雪崩过程的持续进行以达到保护 APD 的作用。

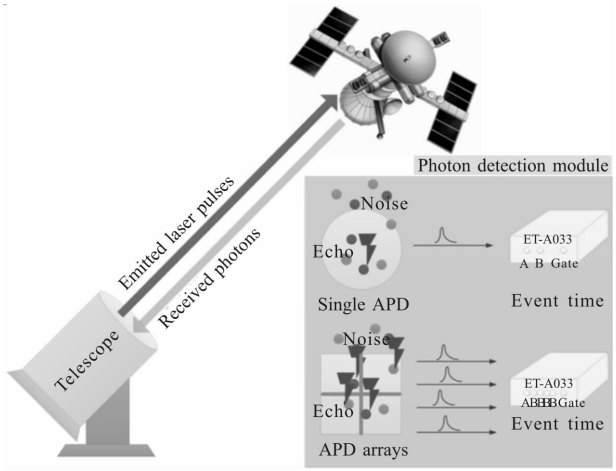

图 1 激光测距中单元型 APD 与 APD 阵列探测效果示意

Fig.1 Scheme of laser ranging with single APD and APD arrays

文中讨论的是探测器死时间与门控宽度相当甚至更长的情况，即“长死时间”的情况，此时单元型 APD 在门控时间内最多只能产生一个雪崩脉冲，当有任意光子获得响应后，抑制电路控制 APD 停止该

脉冲周期内的工作，不考虑单元型 APD 在一次脉冲周期内复活的情况。因此，在背景噪声较强时，噪声光子极有可能先于回波光子而引发响应。回波光子被探测到的前提是先于回波到达的噪声光子未引起 APD 触发。而 APD 阵列每个单元独立工作、独立输出，可以最多产生与阵列单元数相当的电信号个数，即便若干探测单元被噪声触发而停止工作，其他单元仍有机会测到回波，从而有效提高回波和噪声的探测概率。

1.2 APD 阵列探测信噪比理论模型

信噪比(Signal-to-noise Ratio，SNR)是激光测距性能分析中的一个重要参数，能够表征回波从噪声中被识别出的能力。由光子随机涨落的统计特征出发，探测信噪比可以表示为[18]：

$$\mathrm{SNR}=\frac{n_{\mathrm{echo}}}{\sqrt{n_{\mathrm{echo}}+n_{\mathrm{noise}}}} \tag{1}$$

式中：n_{echo} 表示经过光电转换后探测器响应的回波光子数；n_{noise} 表示在回波分布范围内探测器响应的噪声光子数。为降低背景噪声对探测的影响，通常需要设置门控时长 t_{gate} 以降低噪声光子。假设共有 n_0 个回波光子到达 1 个阵列单元数为 N、占空比为 γ 的 APD 阵列上，并为了简单起见，假定光子在空间上均匀分布，那么在背景噪声速率为 v_{noi} 时，APD 阵列总共获得的光子数分布以及各个阵列单元接收到的光子数分布如图 2 所示。因为占空比 γ 的存在，到达探测器每个单元的光子数受到一定减弱。因为每个阵列单元(APD)的“关门”问题，光子到达时间的先后会导致不同探测结果。假设具有一定时间展宽 t_{broad} 的回波光子位于门控时间内某一位置 t_1，该位置将门控时间内分为 3 个探测区间，即回波前噪声区间、回波区间、回波后噪声区间，其中回波前噪声区间的噪声总数为 $n_{\mathrm{noi1}}=v_{\mathrm{noi}}\cdot t_1$，回波所在区间噪声总数为 $n_{\mathrm{noi2}}=v_{\mathrm{noi}}\cdot t_{\mathrm{broad}}$，回波后噪声区间的噪声总数为 $n_{\mathrm{noi3}}=v_{\mathrm{noi}}\cdot(t_{\mathrm{gate}}-t_1-t_{\mathrm{broad}})$。根据 APD“关门”特性可知，回波光子区间光子被探测的前提是回波前噪声区间没有触发探测器的响应。因此回波区间内回波光子探测概率 P_{echo} 与噪声光子探测概率 P_{noi} 分别为：

$$P_{\mathrm{echo}}=\mathrm{e}^{-\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi1}}}\cdot\frac{n_0}{n_0+n_{\mathrm{noi2}}}\cdot(1-\mathrm{e}^{-(\gamma/N\cdot n_0+\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi2}})})$$

$$P_{\mathrm{noi}}=(1-\mathrm{e}^{-\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi1}}})+\mathrm{e}^{-\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi1}}}\cdot\frac{n_{\mathrm{noi2}}}{n_0+n_{\mathrm{noi2}}}\cdot(1-\mathrm{e}^{-(\gamma/N\cdot n_0+\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi2}})})+\mathrm{e}^{-\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi1}}}\cdot\mathrm{e}^{-(\gamma/N\cdot n_0+\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi2}})}\cdot(1-\mathrm{e}^{-\gamma/N\cdot n_{\mathrm{noi3}}}) \tag{2}$$

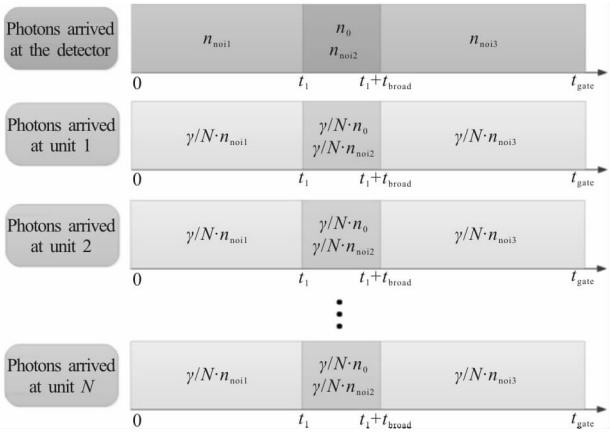

图 2 APD 阵列总体与各阵列单元到达光子分布情况

Fig.2 Arrived photon distribution of total APD arrays and each single APD array

假设总测量时长为 t_{mea}，激光发射重复频率为 f_{rep}，那么由公式(1)和公式(2)可知，回波所在区间范围内 APD 阵列的探测信噪比为：

$$\mathrm{SNR}=\frac{N\cdot t_{\mathrm{mea}}\cdot f\cdot P_{\mathrm{echo}}}{\sqrt{N\cdot t_{\mathrm{mea}}\cdot f\cdot P_{\mathrm{echo}}+N\cdot t_{\mathrm{mea}}\cdot f\cdot P_{\mathrm{noi}}}}=\sqrt{N}\cdot\frac{t_{\mathrm{mea}}\cdot f\cdot P_{\mathrm{echo}}}{\sqrt{t_{\mathrm{mea}}\cdot f\cdot P_{\mathrm{echo}}+t_{\mathrm{mea}}\cdot f\cdot P_{\mathrm{noi}}}}=\sqrt{N}\cdot\mathrm{SNR}_{\mathrm{one}} \tag{3}$$

由此可见，APD 阵列总体的探测信噪比是每个阵列单元信噪比的 $\sqrt{N}$ 倍。公式(3)建立了 APD 阵列探测信噪比 SNR 随阵列单元数 N 的变化关系，该变化规律随回波强度 n_0、噪声强度 v_{noi}、占空比 γ 的变化而变化。

2 阵列单元数对探测信噪比的影响分析

在激光测距实验中，不同目标回波光子数不同，并且不同观测条件下噪声强度也不同。为获得更好的探测信噪比，需综合考虑回波强度、噪声强度、回波位置、占空比对信噪比的影响，根据具体情况合理选择合适的阵列单元数。以 kHz 激光测距系统为例，考察了不同情况下观测时长为 1 s、距离门长度为 1 μs 条件下探测信噪比 SNR 随阵列单元数 N 的变化。

2.1 不同回波光子数条件

回波光子数大小对于整个探测信噪比的提升具有至关重要的作用，因为当平均回波光子数小于 1 且噪声水平仅为 45 cps(counts per second)时，单元型 APD 和 APD 阵列往往最多只能接收到 1 个回波，

APD 阵列任意阵列单元探测到回波后，其他阵列单元只能探测到噪声而不会再探测到回波，增加了噪声探测概率。因此图 3(a)中，APD 阵列的每个阵列单元的信噪比随阵列单元数增加而降低。而当噪声水平高达 10^6 cps 时，APD 阵列能够降低到达每个阵列单元上的噪声个数，所以各阵列单元信噪比在一定范围内会先增加，见 3(c)，而后随阵列单元数进一步增大回波探测概率下降，导致各阵列单元信噪比逐渐下降。当回波光子数较低时，探测信噪比随 APD 阵列单元数增加变化不明显，见 3(b)和图3(d)中点线和实线。然而当回波光子数大于 10 时，APD 阵列能够极大增加回波探测概率，探测信噪比随阵列单元数增加而呈现增加的趋势，见图 3(b)和图 3(d)中点划线，当阵列单元数达到 25 后，探测信噪比逐渐趋于平稳。因此可以发现，APD 阵列对于回波光子数较大的目标具有较明显的探测信噪比优势。

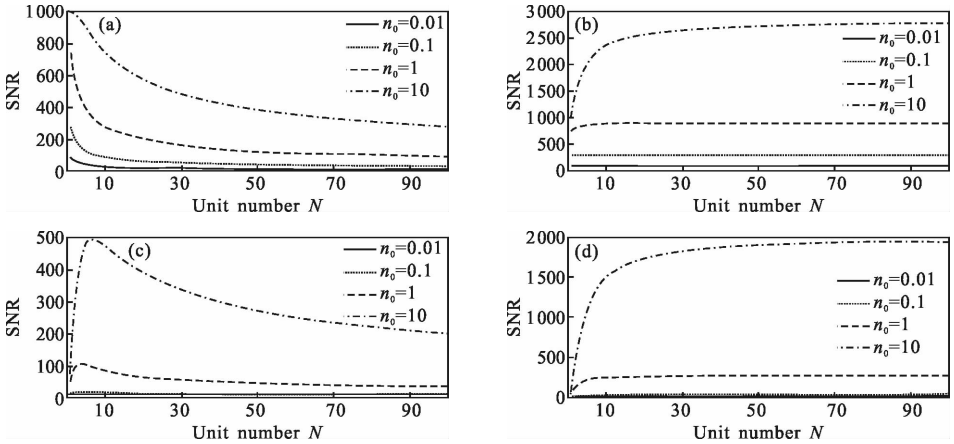

图 3 噪声分别为 45 cps (上)和 10^6 cps(下)时，探测信噪比随回波光子数的变化。其中左边为 APD 阵列每个阵列单元的信噪比，右边为 APD 阵列总体的探测信噪比

Fig.3 SNR versus number of echoes under different noise rate of 45 cps (top) and 10^6 cps (bottom). And left is for every single APD, and right is for the total APD arrays

2.2 不同噪声条件

噪声与回波一起进入望远镜被探测面接收，影响回波探测概率，不同噪声背景下 APD 阵列探测信噪比存在明显差异。当回波光子数仅为 0.01 时，APD 阵列探测到噪声的概率增加而回波探测概率较小，每个阵列单元探测信噪比随单元数增加而降低(如图 4(a)所示)，APD 阵列对探测信噪比的提升效果基本可忽略(如图 4(b)所示)。当回波光子数为 100、背

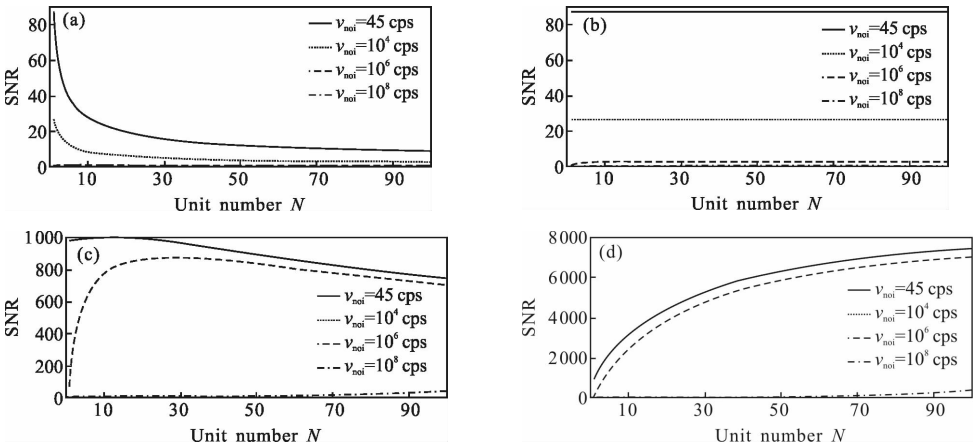

图 4 回波光子数分别为 0.01(上)和 100(下)时，探测信噪比随噪声速率的变化。其中左边为 APD 阵列每个阵列单元的信噪比，右边为 APD 阵列总体的探测信噪比

Fig.4 SNR versus noise rate under different number of echoes of 0.01(top) and 100(bottom). And left is for every single APD, and right is for the total APD arrays

景噪声小于 10^6 cps 时，探测信噪比随阵列单元数增加而增加，如图 4(d)中点线、实线、虚线所示，而当背景噪声进一步增大时，APD 阵列探测到很多噪声，回波信号被湮没，此时探测信噪比很小且基本不随阵列单元数变化(如图 4(d)中点划线所示)。因此，在白天激光测距中 APD 阵列较难取得优于单元型 APD 的探测效果，除非回波光子数很强且位于门控前端，确保 APD 阵列优先被回波光子触发。

2.3 不同回波位置条件

对目标进行跟踪和捕获过程中，目标预报轨道是否精确对于测距时距离门时间延迟设置有很大影响，当轨道预报较为精确时，距离门往往可以设置到使回波处于距离门前端的位置，从而使回波有更大概率获得优先触发。而空间碎片轨道预报精度较差，导致回波在距离门内的位置对探测信噪比有一定影响。如图 5 所示，当回波光子数为 0.01 时，回波位于门控时间较前方位置更有利于回波触发 APD 响应，从而增加探测信噪比，尤其在噪声水平较高时回波位置对探测信噪比的影响很大，如图 5(d)所示。当回波光子数为 100 且门控时间内噪声光子数较小时，探测器被回波光子触发的概率基本不随回波位置变化，探测信噪比随阵列单元数的变化基本相近，如图5(f)所示。因此，提高空间碎片轨道预报精度，对数据进行实时处理以识别回波后更精确控制距离门时间延迟，有助于提高 APD 阵列的探测信噪比。

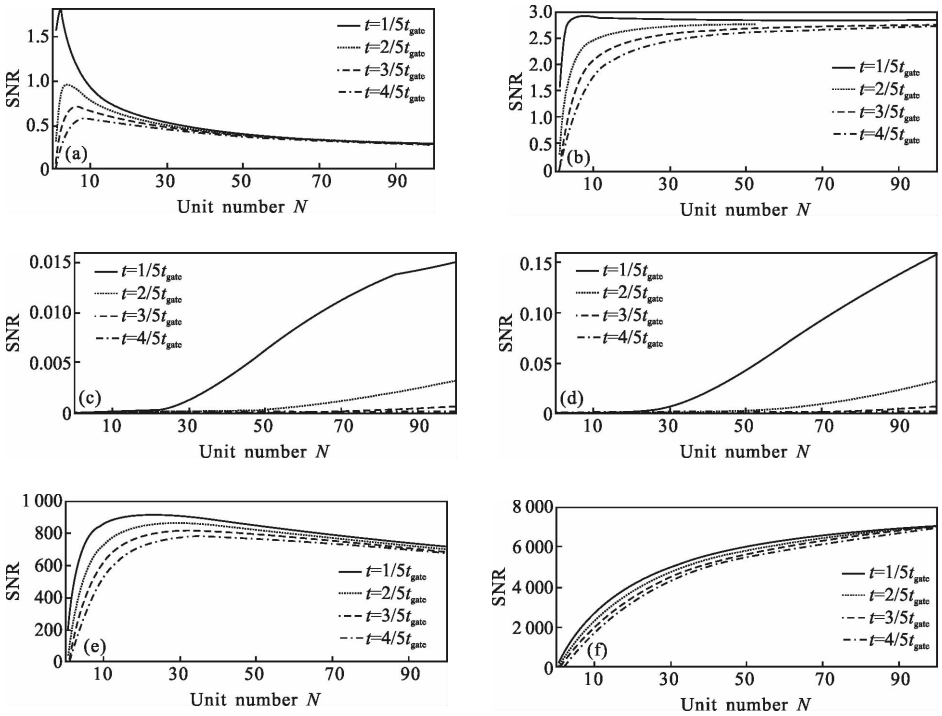

图 5 回波光子数为 0.01，噪声速率 10^6 cps(上)，回波光子数为 0.01，噪声速率 10^8 cps(中)和回波光子数为 100，噪声速率 10^6 cps(下)时，探测信噪比随回波所在位置的变化。其中左边为 APD 阵列每个阵列单元的信噪比，右边为 APD 阵列总体的探测信噪比

Fig.5 SNR versus the location of echoes of under different number of echoes and noise rate. n_o=0.01, v_{noi}=10^6 cps(top), n_o=0.01, v_{noi}=10^8 cps(middle) and n_o=100, v_{noi}=10^6 cps(bottom). And left is for every single APD, and right is for the total APD arrays

2.4 不同占空比条件

APD 阵列占空比的存在引起一部分接收光能量的损失，在实际使用过程中，常在阵列前方施加微透镜阵列以提高等效占空比，从而避免过多能量损失。假设微透镜紧密排列且透过率极高，那么占空比可以提高到 78.5%，如图 6 所示。

图 7 展示了不同占空比条件下，探测信噪比随阵列单元数的变化关系。可以发现占空比越大，相同观测条件下探测信噪比越高，而当回波和噪声强度较弱时，增加阵列单元数对于探测信噪比的提升影响不大，如图 7(b)所示。当回波光子数较小为 0.01 时，阵列单元数为 4 基本能够达到最优的探测信噪比，且占空比越大探测信噪比越高。当回波光子数较

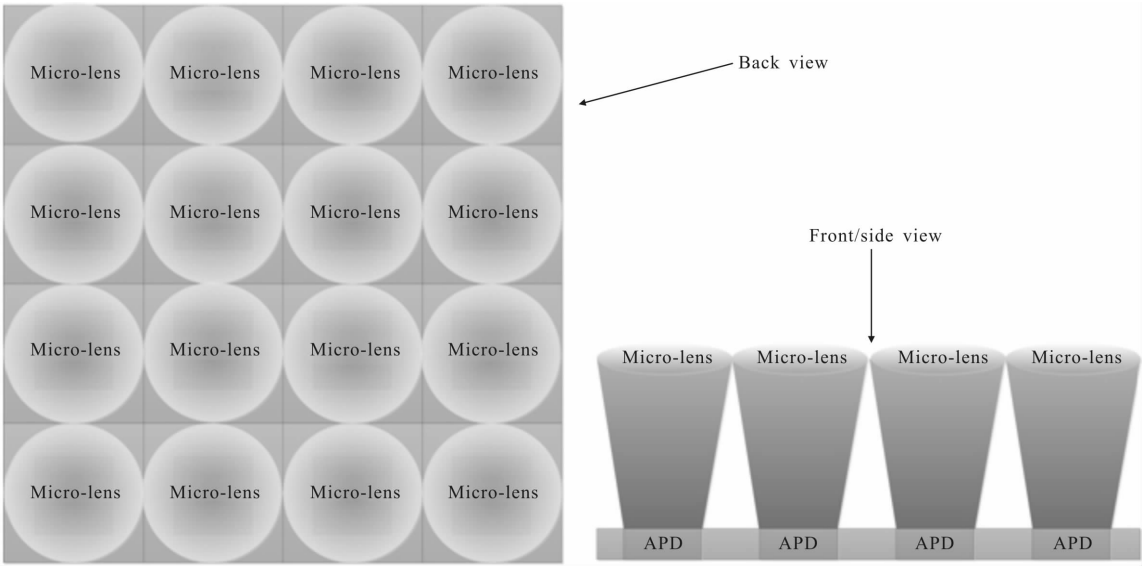

图 6 微透镜阵列提高 APD 阵列等效占空比示意

Fig.6 Micro-lenses for improvement of fill factor for APD arrays

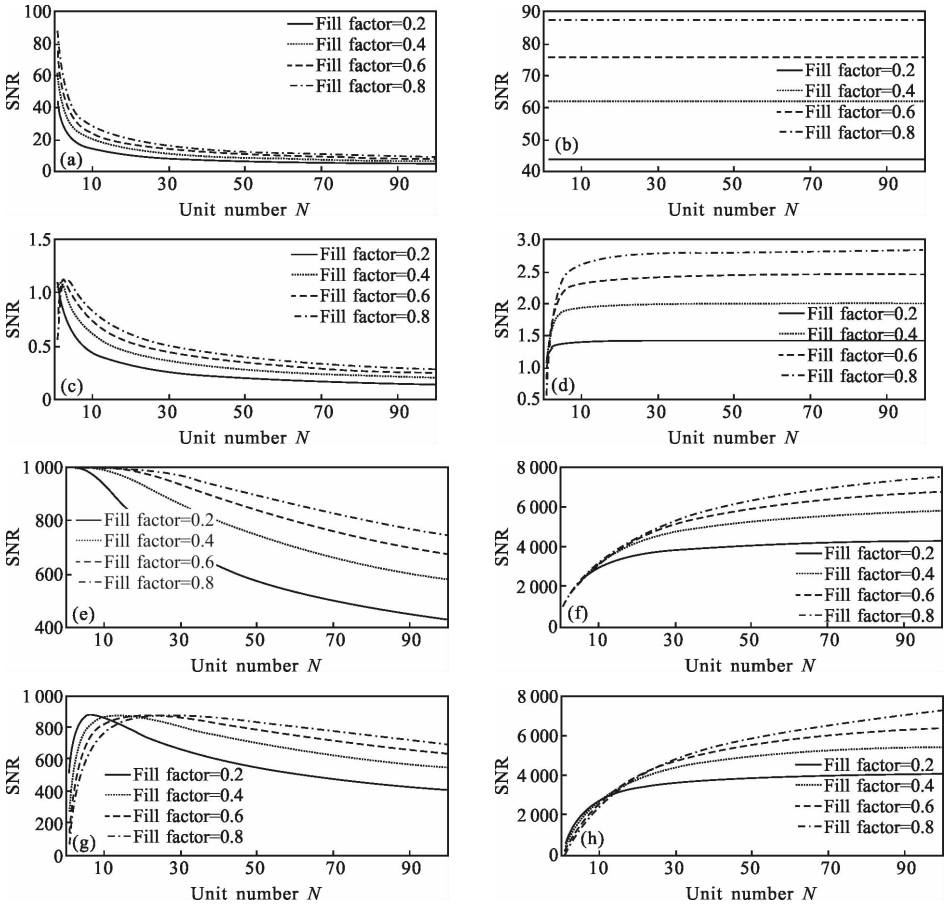

图 7 回波光子数为 0.01，噪声速率 45 cps(第一行)，回波光子数为 0.01，噪声速率 10^6 cps(第二行)，回波光子数为 100，噪声速率 45 cps(第三行)和回波光子数为 100，噪声速率 10^6 cps(第四行)时，探测信噪比随占空比的变化。其中左边为 APD 阵列每个阵列单元的信噪比，右边为 APD 阵列总体的探测信噪比。

Fig.7 SNR versus fill factor under different number of echoes and noise rate. n_o=0.01, v_{noi}=45 cps(line 1), n_o=0.01, v_{noi}=10^6 cps(line 2), n_o=100, v_{noi}=45 cps(line 3), and n_o=100, v_{noi}=10^6 cps (line 4). And left is for every single APD, and right is for the total APD arrays

大时,25 元 APD 阵列能够获得更佳的探测信噪比。

3 结 论

提高探测信噪比从而在噪声中有效识别出回波是激光测距中一个重要任务。APD 阵列的诞生可以解决目前激光测距系统中单元型 APD 遇到光子随即“关门”的问题,有助于提高光子探测效率。然而 APD 阵列在提高回波探测概率的同时也提高了噪声探测概率，且其占空比的存在导致了一定的接收光能量损失。为了合理选择 APD 阵列的阵列单元数，文中通过分析回波和噪声分布情况，结合光子探测概率建立了探测信噪比随阵列单元数的变化关系。并对影响探测信噪比变化的回波光子数、噪声强度、回波位置、占空比等因素进行了讨论。分析结果表明,APD 阵列在回波和噪声光子数较大的情况下对探测信噪比的提升效果更为明显，此时 25 元 APD 阵列能够达到较高探测信噪比,而 4 元 APD 阵列则适用于回波和噪声光子数较弱时的远距离单光子水平空间碎片激光测距。另一方面,提高激光能量以获得更高回波光子数、提高轨道预报精度以使回波位于距离门前端、提高 APD 阵列占空比以降低接收光能量损失，有助于使 APD 阵列获得更高探测信噪比。文中建立的 APD 阵列信噪比随阵列单元数的变化关系,充分考虑了回波能量、噪声强度、回波位置、占空比等 4 个因素的影响，为不同观测条件下合理选择 APD 阵列的单元个数提供了 1 种有效方法。

参考文献:

[1] Sosnica K, Thaller D, Dach R, et al. Satellite laser ranging to GPS and GLONASS [J]. ***Journal of Geodesy***, 2015, 89 (7): 725-743.

[2] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(8): 1469-1473. (in Chinese)
李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1469-1473.

[3] Li H, Chen S, You L, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging [J]. ***Optics Express***, 2016, 24 (4): 3535-3542.

[4] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Deng Huarong, et al. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(1): 0102002. (in Chinese)
张忠萍, 张海峰, 邓华荣, 等. 双望远镜的空间碎片激光测距试验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0102002.

[5] Li Ming, Xue Li, Huang Chen, et al. Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(2): 260-267. (in Chinese)
李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 260-267.

[6] Sun H, Zhang H F, Zhang Z P, et al. Experiment on diffuse reflection laser ranging to space debris and data analysis supported by the National Natural Science Foundation of China [J]. ***Research in Astronomy and Astrophysics***, 2015, 15(6): 909-920.

[7] Xu Zhengping, Shen Honghai, Yao Yuan, et al. Scaless laser active imaging validating system by directly ranging [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24 (2): 251-259. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 251-259.

[8] Wang Rui. Effect of gate width of laser range gating imaging on image SNR [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8 (6): 951-956. (in Chinese)
王锐. 激光距离选通成像门宽对图像信噪比影响[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 951-956.

[9] Kirchner Georg, Franz Koidl, Farhat Iqbal. Pushing Graz SLR from 2 kHz to 10 kHz repetition rate [C]//Institute for Space Research Austrian Academy of Sciences, International Workshop on Laser Ranging, 2011.

[10] Kang Y, Lu H X, Lo Y H, et al. Dark count probability and quantum efficiency of avalanche photodiodes for single-photon detection [J]. ***Applied Physics Letters***, 2003, 83(14): 2955-2957.

[11] Albota M A, Aull B F, Fouche D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. ***Lincoln Laboratory Journal***, 2002, 13 (2): 351-370.

[12] Henriksson M. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system [J]. ***Applied Optics***, 2005, 44(24): 5140-5147.

[13] Kou Songfeng, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Laser ranging system based on 4 -element APD arrays [J]. ***Laser and Infrared***, 2008, 38(6): 537-540. (in Chinese)

寇松峰, 陈钱, 顾国华, 等. 基于 4 元 APD 阵列的激光测距技术研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 537-540.

[14] Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, et al. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2012, 39(4): 200-205 (in Chinese)
徐璐, 张宇, 张勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 200-205.

[15] Xu Lu, Zhang Yong, Zhang Yu, et al. Four Gm-APDs photon counting imaging lidar to improve detection performances [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44 (9): 2583-2587. (in Chinese)
徐璐, 张勇, 张宇, 等. 四 Gm-APD 探测器提高激光雷达探测性能的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2583-2587.

[16] Luo H, Xu B, Xu H, et al. Maximum detection range limitation of pulse laser radar with Geiger-mode avalanche photodiode array [J]. ***Journal of Modern Optics***, 2015, 62 (9): 761-768.

[17] Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, et al. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2015, 42(6): 266-272. (in Chinese)
翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 266-272.

[18] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting [J]. ***Measurement Science and Technology***, 2000, 11(6): 712-716.