

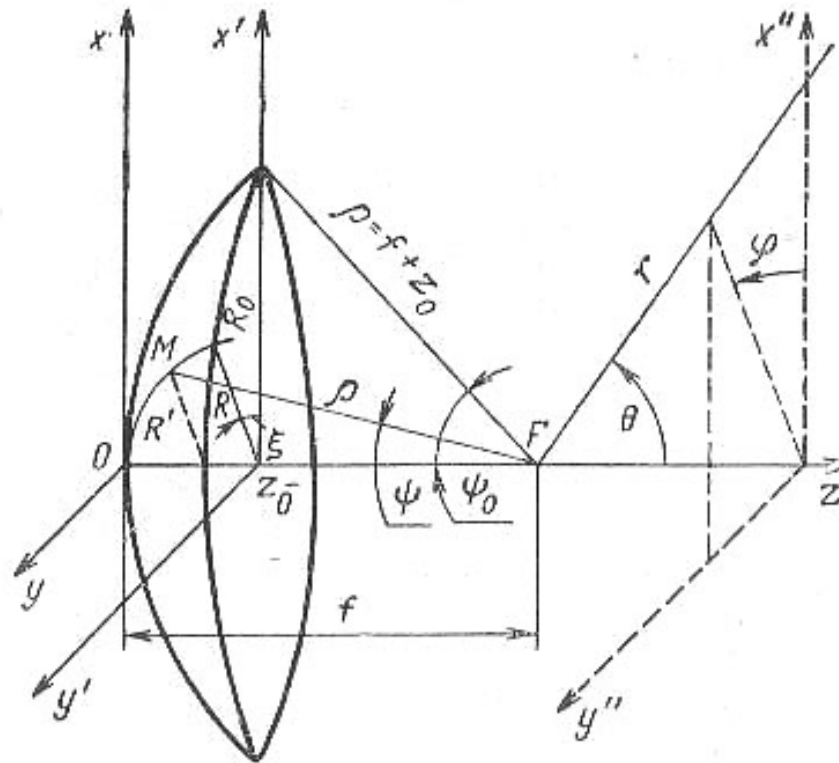
**Аналіз і синтез випромінюючих систем**

**Дзеркальні антени**

## Загальні положення

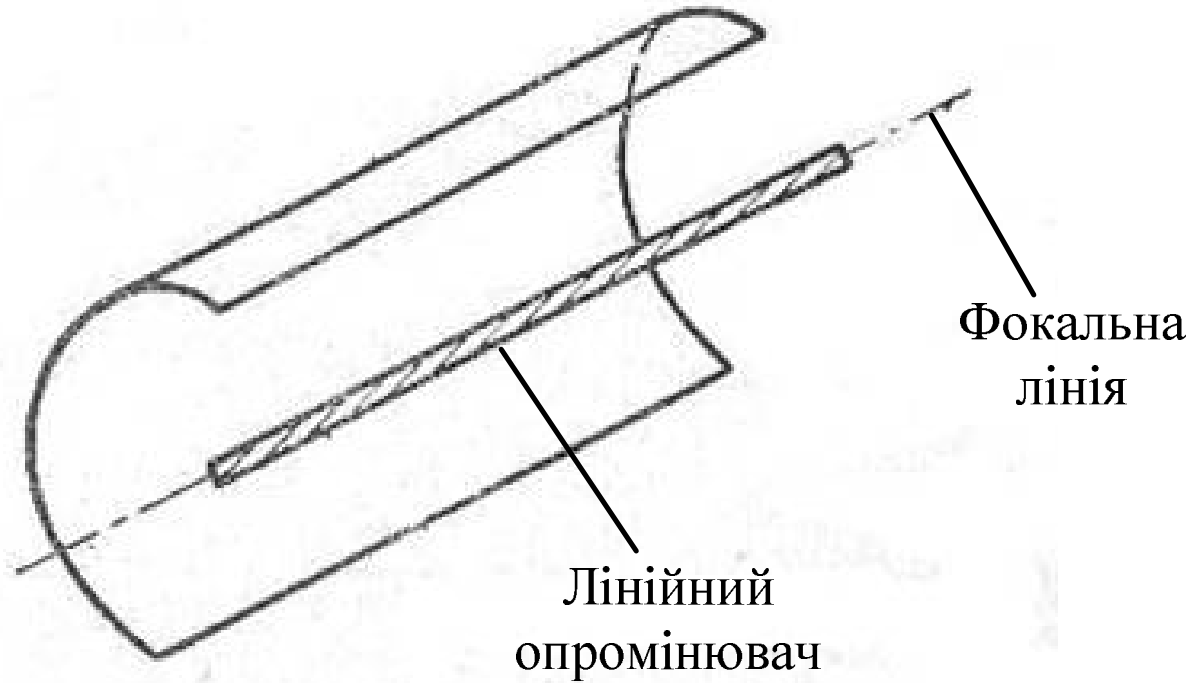
**Дзеркальними (рефлекторними)** називають апетурні антени, у яких використовують явище відбиття хвиль від металевого дзеркала (рефлектора) для перетворення слабкоспрямованих електромагнітних хвиль, створюваних первинним випромінювачем (опромінювачем), у гостроспрямовані хвилі, випромінювані у простір.

Найпоширеніші види дзеркал: параболоїд обертання (рисунок)



## Загальні положення

та параболічний циліндр



## Загальні положення

**Параболоїд** є поверхнею, яку описує парабола при обертанні навколо своєї осі. **Параболічний циліндр** утворюється при переміщенні параболи уздовж паралельних прямих, які називають твірні циліндра. Бувають і інші дзеркала, побудовані на основі параболи.

**Розкрив (апертура) дзеркальної антени** – частина площини, обмежена зовнішніми краями рефлектора. Розкрив параболічного циліндра має форму прямокутника за сторонами  $a$  і  $b$ .

**Фокусна відстань  $f$  параболічного рефлектора** – найкоротша відстань від його поверхні до точки  $F$ , яку називають фокусом параболи.

**Фокальна лінія параболічного циліндра** є паралельною до твірних циліндра та проходить через фокус початкової параболи.

**Кут розкриву дзеркала**  $2\psi_0$  - подвоєне максимальне значення кута  $\psi_0$ .

## Загальні положення

### Рівняння параболы

$$\rho = \frac{f}{\cos^2(0,5\psi)},$$

а кут розкриву  $2\psi_0$  пов'язаний з діаметром параболоїда  $d$  та його фокусною відстанню  $f$  співвідношенням

$$\operatorname{ctg} \psi_0 = 4f/d.$$

Рефлектор називають **глибоким (короткофокусним)**, якщо

$$2\psi_0 > \pi, \quad f < 0,25d$$

і фокус  $F$  розташовано всередині дзеркала ; якщо ж

$$2\psi_0 < \pi, \quad f > 0,25d$$

і фокус винесено з площини розкриву, то рефлектор називають **мілким (довгофокусним)**. Фазовий центр опромінювача суміщають з фокусом дзеркала, а за опромінювачем розташовують контррефлектор, щоб звести до мінімуму випромінювання опромінювача поза кутом розкриву дзеркала .

## Загальні положення

Внутрішня поверхня дзеркала повинна мати максимально можливу провідність. Для зменшення парусності та маси дзеркала його іноді роблять не суцільним, а сітчастим, чи з перфорованих листів. Розміри отворів підбирають такими, щоб через них просочувалось не більше 1...2 % потужності падаючих на дзеркало хвиль.

В якості оброміювачів дзеркал широко використовують вібратори (штиреві та щілинні), відкриті кінці хвилеводів, рупори тощо.

## Приклади дзеркальних антен



Приклад дзеркальної антени з суцільним рефлектором

## Приклади дзеркальних антен



Приклад дзеркальної антени з сітчастим рефлектором



## Приклади дзеркальних антен



Приклад дзеркальних антен з сітчастим і суцільним рефлекторами

## Спрямовані властивості параболоїда обертання

1. Через розкрив параболічної антени проходять ЕМХ. Тому площина розкриву антени неперервно заповнена елементами Гюйгенса, кожен з яких складає деяку частину хвильового фронту. Поля цих синфазних елементів інтерферують і в результаті випромінювані хвилі концентруються у певних напрямках. **Ступінь такої концентрації тим більший, чим більше відношення діаметра параболоїда до довжини хвилі.**
2. **Суттєвий вплив на ширину ДН має нерівномірність розподілу амплитуди поля у розкриві рефлектора.**
3. Електричне поле у розкриві довгофокусного дзеркала, яке опромінюють (для прикладу) вертикальним вібратором, має основну (вертикальну) складову та перехресну (горизонтальну) складову. Основна поляризація корисна, а перехресна – шкідлива.

Якщо  $2\psi_0 = \pi$ , то фокус параболоїда перебуває у площині його розкриву, причому тут у точках з координатами  $x = \pm d/2$ , які називають полюсами, ЕМП повністю відсутнє (тому що полюси розташовано на осі вібратора (опромінювача), уздовж якої неможливе випромінювання).

## Спрямовані властивості параболоїда обертання

При подальшому збільшенні кута розкриву рефлектора ( $2\psi_0 > \pi$ ) параболоїд стає короткофокусним; у хвилі, яка проходить через його апертуру, з'являються шкідливі зони, у яких напрям горизонтальної складової електричного поля змінюється на протилежний, порівняно з напрямком його основної частини розкриву параболоїда. Тому збільшується нерівномірність поля у розкриві рефлектора та дарма витрачається енергія енергія на опромінювання шкідливої зони. З метою уникнення появи таких зон зазвичай використовують довгофокусні параболоїди. Але при цьому виникає питання зменшення їхньої фізичної довжини. Детальніше про це – далі.

4. **Вплив кута розкриву параболоїда на коефіцієнт використання його поверхні: зі зменшенням кута розкриву більша частина енергії опромінювача втрачається поза рефлектором, проте сам рефлектор при цьому опромінюється рівномірніше. Виникає протиріччя: розсіяння енергії зменшує КСД антени, а рівномірність опромінення рефлектора сприяє збільшенню коефіцієнта використання поверхні.** Доведено, що максимальний коефіцієнт підсилення антени буде при такому куті розкриву  $2\psi_0$ , при якому поле на краях розкриву згідно ДН опромінювача становить приблизно 0,3 за амплітудою та 0,1 за потужністю від поля у центрі розкриву.

## Спрямовані властивості параболоїда обертання

Тоді добуток КВП\*коефіцієнт підсилення=0,45...0,65, кут розкриву при цьому становить 120...140 градусів, ширина головної пелюстки ДН

$$2\theta_{0,5} = (65...70)^{\circ} \frac{\lambda}{d}$$

і рівень першої бічної пелюстки – (22...24) дБ.

- 5. Зміщення опромінювача уздовж осі рефлектора:** якщо фазовий центр опромінювача перебуває у фокусі рефлектора, то промені після відбиття йдуть паралельно до осі рефлектора, завдяки чому максимум випромінювання співпадає з віссю рефлектора, а фронт хвилі є площиною, яка перпендикулярна до цієї осі. Якщо ж змістити фазовий центр опромінювача уздовж осі параболічної антени, то це спричинить розширення її ДН (оскільки фронт хвилі стає сферичним чи циліндричним, то максимум випромінювання при цьому залишається там само).
- 6. Відхилення опромінювача від осі рефлектора на деякий кут  $\delta$  :** спричиняє нахил відбитих променів, і, як наслідок, нахил променя максимуму випромінювання на кут  $\delta$ . На практиці допускається таке зміщення опромінювача, при якому  $\delta < (2...3) \cdot 2\theta_{0,5}$ . Якщо ж  $\delta > (2...3) \cdot 2\theta_{0,5}$ , то промінь надмірно розширюється і рівень бічних пелюсток збільшується. 12

## Спрямовані властивості параболоїда обертання

*До недоліків однодзеркальних параболічних антен відносять:*

- недостатньо високий КСД та КВП;
- недостатньо низький рівень бічних пелюсток та громіздкість кріплення опромінювача до дзеркала;
- затінення хвиль опромінювачем;
- у ряді випадків неприйнятні поздовжні розміри.

**Значною мірою подолати ці недоліки дозволяють дводзеркальні антени.  
Особливо добре такі антени дозволяють зменшити поздовжні розміри.**

## Дводзеркальні антени

**Принцип дії дводзеркальних антен** базується на перетворенні сферичного хвильового фронту, випромінюваного джерелом електромагнітної хвилі у плоский хвильовий фронт у розкриті антени за рахунок послідовного перевідбиття від двох дзеркал: допоміжного та основного з відповідними профілями.

Тому *такі антени завжди мають у своєму складі два дзеркала (основне та допоміжне) та опромінювач*. Опромінювач, так само, як і в однодзеркальній антені, є слабкоспрямованою антеною. Випромінювання опромінювача потрапляє на допоміжне дзеркало і після відбиття від нього спрямовується в сторону основного дзеркала, основна функція якого – сформувати поле випромінювання з плоским фронтом.

## Дводзеркальні антени

### Основні переваги дводзеркальних антен:

- розширені можливості з формування потрібного амплітудно-фазового розподілу у розкритті антени;
- ширші можливості з вибору опромінювача;
- зменшення довжини фідерного тракту;
- кращі умови щодо розміщення потрібних радіотехнічних блоків;
- додаткові можливості для зменшення “перетікання” потужності через краї основного дзеркала.

### Основні недоліки дводзеркальних антен:

- збільшена площа затінення вузлів, розташованих на оптичній осі антени;
- збільшені геометричні розміри складеного опромінювача (це опромінювач + допоміжне дзеркало);
- збільшується рівень перших бічних пелюсток ДН;
- збільшується вартість конструкції.

**Проте зі збільшенням апертури такої антени її переваги стають вагомішими за недоліки!**

## Дводзеркальні антени

**На практиці самими вдалими виявились такі конструкції:**

- дводзеркальна антена Касегрена (Cassegrain antenna);
- дводзеркальна антена Грегорі (Gregorian antenna).

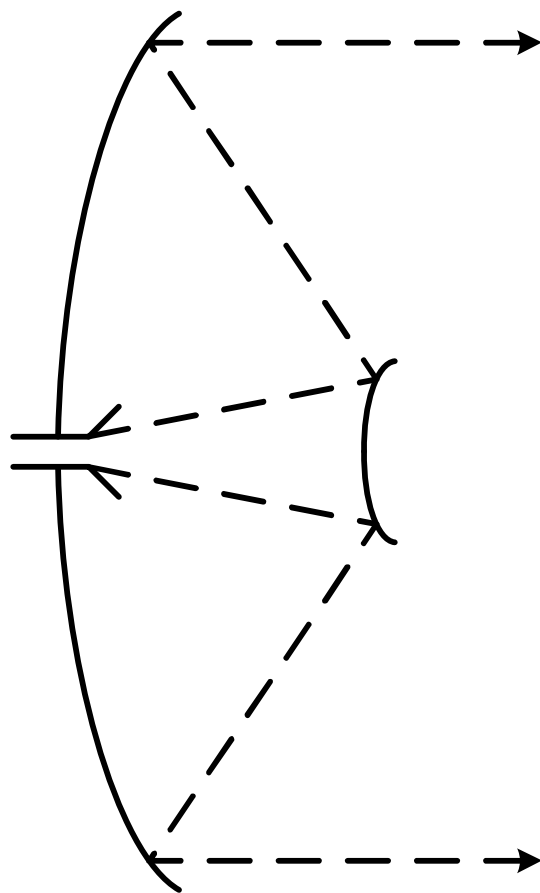
**У класичних схемах Касегрена та Грегорі використовують таку властивість відбиття сферичної хвилі від поверхонь другого порядку:**

**сферична хвиля, випромінювана джерелом з фазовим центром, який співпадає з одним із фокусів довільної поверхні другого порядку, в результаті перевідбиття від неї перетворюється знову у сферичну хвилю, але з фазовим центром, який співпадає з другим фокусом.**



## Дводзеркальна антена Касегрена

У дводзеркальній антені Касегрена (рисунок) опромінювання великого дзеркала здійснюють за допомогою проміжного відбивача (“вирізка” випуклого гіперболоїда), а рупорний опромінювач розташовують не у фазовому центрі великого дзеркала, а поблизу його вершини. Один з фокусів гіперболоїда співпадає з фокусом параболоїда, а в іншому фокусі перебуває фазовий центр опромінювача. Хід променів у такій антені показано на рисунку.



## Дводзеркальна антена Касегрена

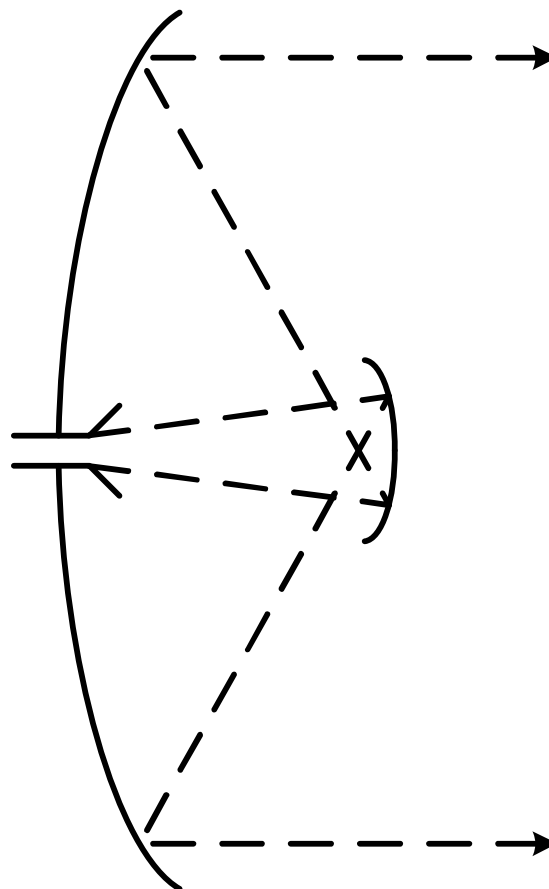
### Переваги такої конструкції:

- спрощення кріплення опромінювача до основного дзеркала та укорочення фідера (зменшення маси антени);
- збільшення її ККД та зменшення шумової температури фідерного тракту;
- зменшення поздовжнього розміру антени: основне дзеркало, оскільки його фокус уявний, можна зробити довгофокусним (сприяє рівномірному опромінюванню дзеркала, зменшення рівня бічних пелюсток ДН, збільшення КВП та КСД антени).

**Недоліки такої конструкції:** оскільки допоміжне дзеркало спричиняє суттєве затінення, до доводиться робити його малим. Але тоді доводиться наближати його до основного дзеркала, внаслідок чого відбувається небажане збільшення впливу антени на опромінювач та фідерний тракт.

## Дводзеркальна антена Грегорі

У дводзеркальній антені Грегорі (рисунок) опромінювання великого дзеркала здійснюють за допомогою проміжного відбивача (еліптично вгнутого), а рупорний опромінювач розташовують не у фазовому центрі великого дзеркала, а у віддаленому фокусі еліпса. Фокальні осі параболоїда та еліпсоїда співпадають. У другому фокусі еліпсоїда перебуває фазовий центр опромінювача. Як видно зі схем поширення променів, у такій антені відбувається інверсія (обернення) відбитого поля.



## Дводзеркальні антени

В антені Касегрена кут розкриву  $2\psi_0$  може бути будь-яким, на відміну від антени Грегорі, де кут розкриву може бути лише меншим, ніж 90 градусів.

В антені Касегрена параболоїд може бути як довгофокусним, так і короткофокусним. Тому антену Касегрена можна зробити компактнішою.

КВП залежить від багатьох факторів, найвагомішими з яких є:

- апертурний КВП розкриву  $V_A$ ;
- коефіцієнт перехоплення потоку енергії опромінювача допоміжним дзеркалом  $V_D$ .

Таким чином, КВП такої антени наближається до значення:

$$V \approx V_A V_D.$$

У звичайних дводзеркальних антен апертурний коефіцієнт не перевищує значення 0,85, а коефіцієнт перехоплення у кращому випадку досягає значень 0,89...0,9.

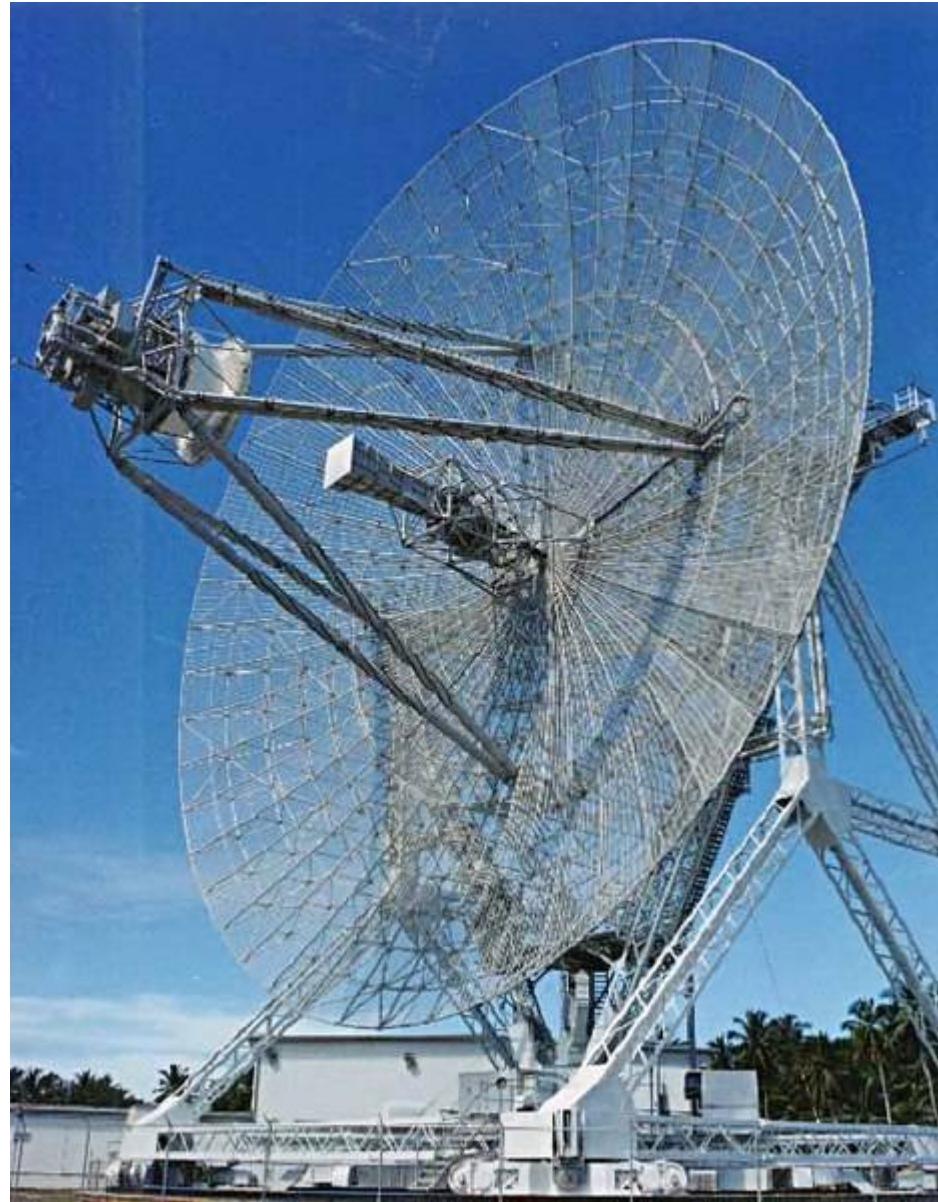
Апертурний коефіцієнт наближається до граничного значення (одиниці) лише у випадку рівномірного та синфазного амплітудного розподілу напруженості електричного поля в апертурі антени.

Коефіцієнт перехоплення иакож наближається до граничного значення (одиниці) тоді, коли весь потік енергії випромінюваних опромінювачем ЕМХ падає на допоміжне дзеркало.

## Дводзеркальні антени

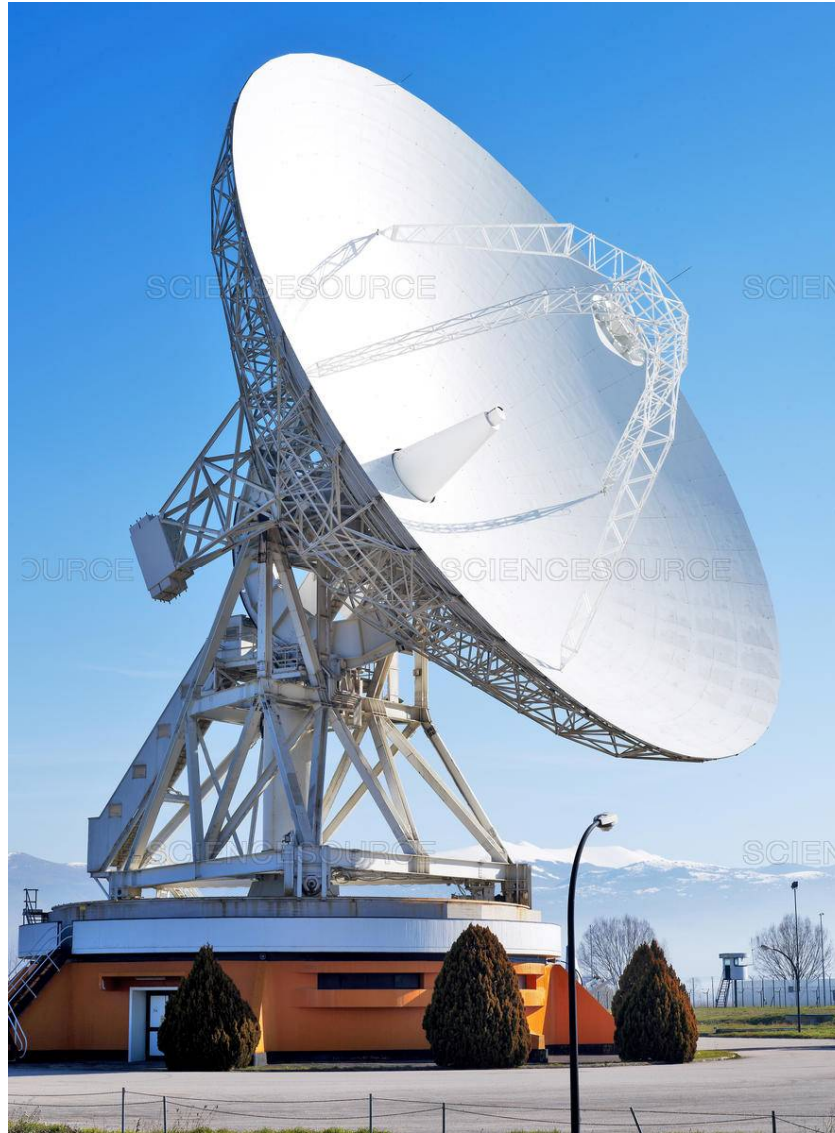
Завдяки своїй високій спрямованості дводзеркальні антени широко використовують у земних станціях супутникового зв'язку та земних станціях супутникового моніторингу – див. слайди на наступних сторінках.

## Дводзеркальні антени



Приклад дводзеркальної антени

## Дводзеркальні антени



Приклад дводзеркальної антени

## Дводзеркальні антени



Приклад дводзеркальної антени



## Дводзеркальні антени



Приклад дводзеркальної антени

## Несиметричні дзеркальні антени

*Для зменшення затінення хвиль опромінювачами та допоміжними дзеркалами* використовують несиметричні дзеркальні (офсетні) антени, у яких опромінювач та інші елементи конструктивно винесено за межі поля променів головного дзеркала.



Приклад несиметричної дзеркальної антени

## Несиметричні дзеркальні антени



Приклад несиметричної дзеркальної антени

## Несиметричні дзеркальні антени



Приклад несиметричної дзеркальної антени

## Несиметричні дзеркальні антени



Приклад несиметричної дзеркальної антени

## Несиметричні дзеркальні антени

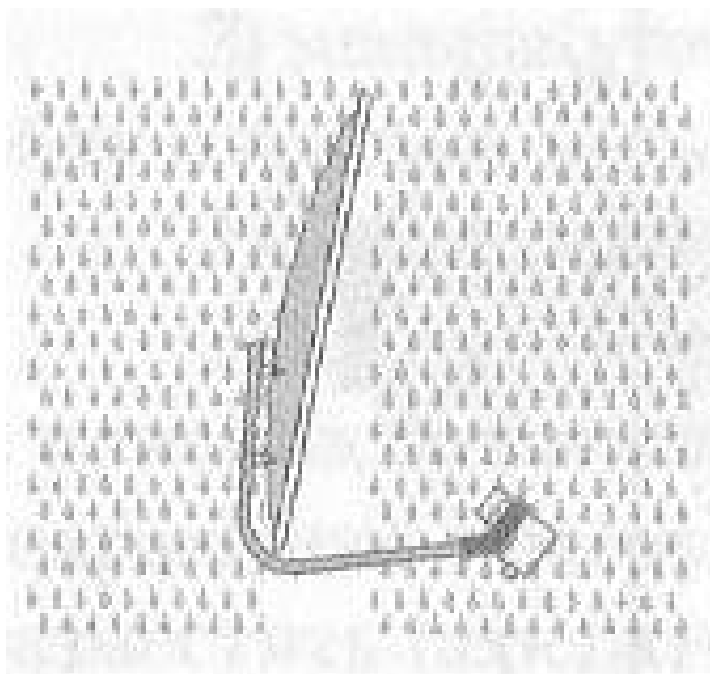


Приклад несиметричної дзеркальної антени

## Переваги та недоліки офсетних та прямофокусних супутникових антен

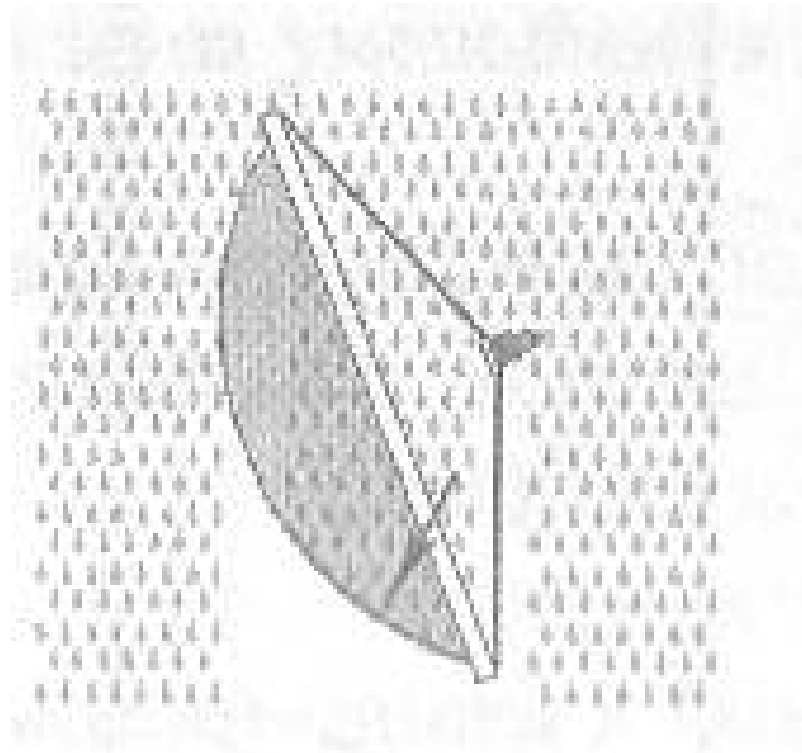
Основними перевагами та недоліками офсетних і прямофокусних супутникових антен є:

- в офсетної супутникової антени фокус хвилі, яку відбиває рефлектор, зміщено в сторону, що суттєво та позитивно впливає на безперешкодне проходження її до опромінювача антени;
- у прямофокусної антени проходженню хвилі заважають як стійки, на яких закріплено конвертер, так і сам конвертер;
- під впливом опадів (дощ, сніг) офсетна супутникова антена має переваги завдяки положенню рефлектора, який діє наче парасолька. Тому опади потрапляють не на діючу поверхню антени, а на її протилежну сторону – рисунок.



## Переваги та недоліки офсетних та прямофокусних антен

Прямофокусна супутникова антена, якщо дивитись на неї збоку, нагадує форму нахиленого ковша, тому таке дзеркало незахищене від опадів. Чим вище розташовано потрібний супутник, тим більше опадів буде накопичуватись на нижній частині дзеркала – рисунок.

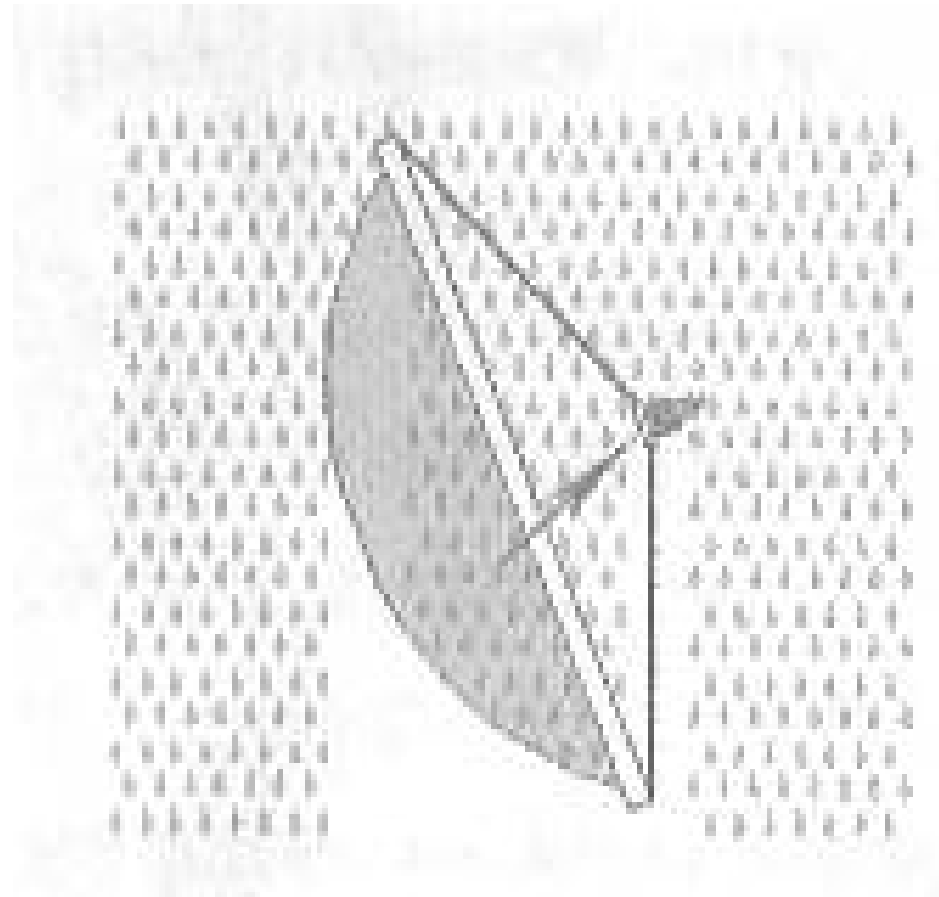


Тому у зимовий час прямофокусну антену потрібно час від часу очищати від снігу, що може бути проблематичним, якщо антена перебуває у важкодоступному місці.



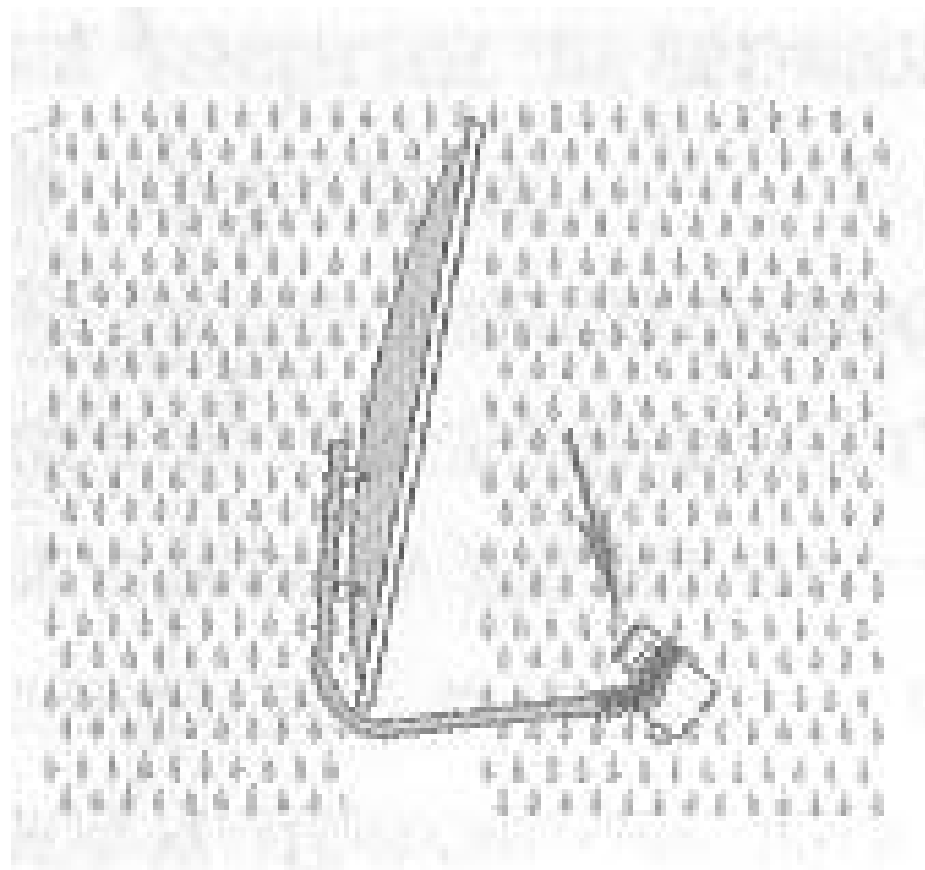
## Переваги та недоліки офсетних та прямофокусних антен

Але в силу того, що опромінювач конвертора прямофокусної антени “дивиться” нижче горизонту, він своїм корпусом захищає дзеркало антени від опадів. Крім цього, завдяки нахиленому положенню корпусу, сам опромінювач дещо захищений від впливу опадів – рисунок.



## Переваги та недоліки офсетних та прямофокусних антен

В офсетної супутникової антени, навіть якщо рефлектор і має невеликий нахил, він залишається відкритим для опадів (див. рисунок). Тому час від часу при великому скупченні крапель води на опромінювачі прийом сигналу може стати зовсім невпевненим. А у зимовий час через налипання снігу на опромінювач конвертор може взагалі покритись льодом. Тому вважають, що офсетна супутникова антена конструктивно зручніша.



## Переваги та недоліки офсетних та прямофокусних антен

Крос-поляризаційний захист антени – послаблення поля перехресної поляризації (крос-поляризованої хвилі) кількісно визначають коефіцієнтом поляризаційного захисту XPD:

$$\text{XPD} = \text{КП антени на основній поляризації} - \text{КП антени на кросовій поляризації}$$

Залежність XPD має складний характер, пов'язаний із конструктивними особливостями антени, а також із параметрами сигналу. При цьому для всіх типів антен максимум XPD бути поблизу головного максимуму ДН антени. Для типових директорних і параболічних антени він перебуває у межах 25...30 дБ, а для окремих типів антена, таких як рупорно-параболічні, його значення може становити 40 дБ і навіть більше.

Коефіцієнт захисної дії F/V характеризує різницю КП антени у головному напрямі (Forward) та КП зі зворотного напрямку (Backward):

$$\text{F/V} = \text{КП (Forward)} - \text{КП (Backward)}$$

Значення F/V сучасних антени становить 20...70 дБ.

Основні параметри дзеркальних антен, наприклад, для робочої частоти 7 ГГц наведено у таблиці на наступному слайді.

## Переваги та недоліки офсетних та прямофокусних антен

Тип характеристик антен	Діаметр, м	КП, дБ	Ширина ДН, градусів	F/B, дБ	XPD, дБ
Стандартні	0,6	30,7	5	40	25...27
	1,2	36,9	2,3	50	25...27
	2,4	42,9	1,3	60	25...27
Поліпшені	0,6	30,7	5	43	25...30
	1,2	36,9	2,3	53	25...30
	2,4	42,9	1,3	64	25...30
Високі	0,6	30,7	5	60	30...32
	1,2	36,9	2,3	65	30...32
	2,4	42,9	1,3	72	30...32
Дуже високі	0,6	30,7	5	62	40
	1,2	36,9	2,3	68	40
	2,4	42,9	1,3	74	40

## Дзеркальні антени

**В принципі, за сукупністю основних параметрів дзеркальні антени є одними з найкращих. КСД таких антен досягає 60 дБ, а ККД наближається до одиниці.**